

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA ANIMALI RISORSE NATURALI
E AMBIENTE

Corso di laurea magistrale in Scienze e Tecnologie per
l'Ambiente e il Territorio

**Dinamica dell'acqua e del bromo in presenza di
cover crops (*Raphanus sativus* L. var.
longipinnatus L. H. Bailey)**

Relatore

Prof. Francesco Morari

Correlatore

Dott. Carlo Camarotto

Laureanda

Silvia Ferrian

Matricola n.

1132824

ANNO ACCADEMICO 2017/2018

INDICE

RIASSUNTO	5
ABSTRACT	7
1. INTRODUZIONE	9
1.1 Premessa	9
1.2 Il ciclo idrologico e il legame con il suolo	9
1.3 Le <i>cover crops</i>	11
1.3.1 Il legame con l'azoto.....	12
1.4 <i>Raphanus sativus</i> var. <i>longipinnatus</i> : effetto dell'apparato radicale sulle dinamiche idrogeologiche acqua-suolo	13
1.5 Scopo della tesi.....	15
2. MATERIALI E METODI	17
2.1 La prova sperimentale.....	17
2.1.1 L'impianto automatizzato	20
2.1.2 Movimento dei soluti.....	25
2.2 L'approccio modellistico	28
2.2.1 Hydrus -1D.....	28
2.2.2 Caratterizzazione idraulica del suolo con Hydrus-1D: l'inversione	30
2.2.3 Hydrus-1D: movimento dei soluti	31
3. RISULTATI	33
3.1 Sperimentazione di campo	33
3.1.1 Dati metereologici.....	33
3.1.2 Monitoraggio del suolo.....	35
3.1.3 Analisi chimiche dell'acqua (Br^-)	39
3.2 Modellistica	41

3.2.1 Hydrus-1D - inversione del modello.....	41
3.2.2 Caratterizzazione del suolo - la curva di ritenzione idrica.....	45
3.2.3 Caratterizzazione del suolo e movimento dei soluti lungo il profilo.....	52
4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI.....	59
5. BIBLIOGRAFIA	62
6. RINGRAZIAMENTI.....	67

RIASSUNTO

La continua crescita della popolazione mondiale inciderà con sempre maggior pressione sulle già esigue risorse idriche e sul ciclo idrologico degli ecosistemi naturali e agrari, in particolare su alcune risorse essenziali per la vita dell'uomo quali l'acqua e il suolo.

Già al giorno d'oggi molte sono le pressioni sulle risorse idriche del pianeta e sul consumo di suolo, che può determinare una compromissione della sua funzionalità tale da limitare/inibire il suo ruolo nel ciclo degli elementi nutritivi. La regione Veneto presenta andamenti di crescita e consumo di suolo molto sostenuti, pari al 20% nel settore agricolo e naturale, anche se la gran parte dei cambiamenti è avvenuta in aree urbane.

Il presente lavoro si propone di studiare come le colture di copertura intercalari (*cover crops*), incidano nel miglioramento della struttura del terreno e come queste possano assorbire determinati elementi nutritivi utilizzati durante le concimazioni evitando così la loro percolazione verso la falda ipodermica, con conseguente inquinamento.

È stata svolta presso l'Azienda sperimentale dell'Università di Padova una prova da cui sono stati raccolti dati di monitoraggio relativi al contenuto idrico del suolo da una serie di lisimetri coltivati con *Raphanus sativus* e suolo nudo, con tre diversi livelli di falda (drenaggio libero, falda a 60 cm, falda a 120 cm). Durante la prova, durata 30 giorni (dal 23 marzo 2017 al 21 aprile 2017), sono stati artificialmente somministrati quantitativi d'acqua tali da evidenziare una percolazione profonda dell'acqua, con contemporanea somministrazione di un elevato quantitativo di bromuro di potassio (KBr), utilizzato come tracciante (lo ione bromuro è solo in minima parte adsorbito dalle particelle solide del suolo e rimane perlopiù nella soluzione circolante).

Sulla base dei dati raccolti, è stato possibile ricostruire una caratterizzazione idraulica del suolo basata sul modello di Van Genuchten-Mualem, grazie alla tecnica dell'inversione effettuata con il software Hydrus-1D. Inoltre, sempre mediante inversione, è stato possibile caratterizzare il suolo anche nel trasporto dei soluti.

I risultati evidenziano valori di conducibilità idrica e potenziale a saturazione mediamente più alti nei terreni privi di copertura, a tutte le profondità. I valori di conducibilità idrica sono comparabili solo nello strato di terreno più superficiale, mentre negli strati più profondi si

nota una più marcata differenza. Ciò indica la sostanziale mancanza di vie preferenziali create dalle grosse radici del rafano.

La prova effettuata con il bromuro di potassio mostra inoltre come le piante di *Raphanus sativus* assorbano in modo consistente il bromo somministrato, così da non farlo più rilevare negli strati profondi di suolo, a differenza dei suoli privi di copertura dove si riscontra, invece, una notevole concentrazione di bromo a tutte le profondità.

ABSTRACT

The continuous growth of the world population has an increasing influence on water resources within the hydrological cycles of natural and agricultural ecosystems.

Currently, there are many pressures on both the water resources of the planet and the energy consumption that occurs in the cycle of nutrients. The Veneto region shows growth and soil consumption trends, equal to 20% of the agricultural and natural sectors, despite most of the changes taking place in urban settings.

The present work aims to examine the cover crop's impact on surrounding soil structure and the adsorption of certain nutrients used during fertilization. This potential for adsorption will prevent percolation to the hypodermic layer, and ultimately mitigate pollution effects.

At the University of Padua Experimental Station, a test was carried out from which data of soil water content was collected from a series of lysimeters adjacent to bare soil plots cultivated with *Raphanus sativus*. The plot surfaces varied between three different levels of gradients: free drainage, 60 cm slope, and 120 cm slope. The trial lasted 14 days, from 23 March 2017 to 21 April 2017, although the monitoring of groundwater levels from the lysimeters dates back to May 2016.

On the basis of the data collected, it was possible to reconstruct a hydraulic characterization of the soil through the Van Genuchten-Mualem model, in conjunction to the inversion technique within the Hydrus-1D software. Moreover, this inversion made it possible to characterize the soil in the transportation of solutes.

Later, with the same software, it was possible to simulate the movement of a bromine tracer (KBr) within the soil. The use of a bromine tracer is perfect for this test, since bromine is not adsorbed into the soil.

From the study it can be observed how the plant (*Raphanus sativus*) succeeds in absorbing a large portion of the administered bromine preventing it from traveling into the deeper layers of the soil (concentration of 1 μL). Alternatively, the uncovered soils contained a significant displacement of bromine concentration in the three assigned depths (surface, sub-surface and deep) confirming the percolation path that occurs in the soil.

1. INTRODUZIONE

1.1 Premessa

L'acqua è stata per lungo tempo considerata come una risorsa abbondante e disponibile in modo pressoché illimitato. Poiché l'acqua è anche un bene di prima necessità, l'ipotesi di ampia disponibilità della risorsa ha fatto sì che per decenni in gran parte del mondo si optasse per una gestione caratterizzata da una continua espansione dell'offerta e della fornitura del servizio idrico. Le grosse infrastrutture costruite, oltre a determinare un forte impatto sul territorio, non sono in grado di soddisfare il crescente bisogno d'acqua in relazione alla crescita demografica mondiale che si stima essere maggiore di 9 miliardi nel 2050 (<http://www.worldometers.info>, 11-12-2017).

L'aumento dell'inquinamento idrico e il cambiamento climatico in corso in questi anni, con una più accentuata stagionalizzazione delle piogge, un aumento dei periodi di siccità e un aumento delle zone del pianeta con in corso processi di desertificazione, hanno di fatto reso l'acqua una risorsa sempre più scarsa. Il prezzo eccessivamente basso, molto al di sotto dei costi di produzione, ha portato inoltre a un uso eccessivo della risorsa e a veri e propri sprechi soprattutto nel settore agricolo.

L'agricoltura ha profondi effetti sulla composizione e sui tassi di ricarica delle acque sotterranee. In molte aree del mondo, i principali carichi chimici di inquinanti nelle falde acquifere superficiali (non confinate) negli ultimi decenni sono stati dominati da costituenti derivati direttamente o indirettamente da pratiche agricole (Pulina G. *et al*, 2011). I carichi di contaminanti agricoli riversati nell'acqua di falda hanno portato a problemi sociali legati alla qualità dell'acqua potabile e hanno causato cambiamenti sostanziali nella geochimica delle acque sotterranee e dell'interazioni acqua-roccia.

1.2 Il ciclo idrologico e il legame con il suolo

L'acqua che beviamo viene prelevata da diverse fonti: sotterranee (sorgenti e falde) e superficiali (fiumi e laghi). Queste fonti sono continuamente rialimentate dal ciclo dell'acqua. Nella scelta del tipo di fonte da utilizzare per l'approvvigionamento degli acquedotti si tende a privilegiare l'acqua sotterranea rispetto a quella superficiale.

Da secoli l'uomo ha imparato a prelevare l'acqua del sottosuolo, oppure a convogliarla dai punti da cui sgorga naturalmente (sorgenti e risorgive). Questo perché l'acqua nel suo viaggio sotterraneo si autodepura e quindi, di solito, è più idonea come acqua potabile rispetto alle acque superficiali. L'acqua sotterranea, tuttavia, anche limitandoci a considerare esclusivamente le acque dolci, è solo una piccola parte dell'acqua presente nel nostro pianeta. Ciò la rende una risorsa ancora più preziosa da salvaguardare (Zanghieri P., 2000).

Contrariamente ad altre risorse naturali che sono presenti nel sottosuolo, l'acqua sotterranea si rinnova, anche se in tempi piuttosto lunghi. Per tale motivo non è una risorsa inesauribile. Anche le acque sotterranee fanno parte del "ciclo dell'acqua", il viaggio che essa compie e che continuerà a compiere fino a quando il sole fornirà l'energia necessaria a farla evaporare (Figura 1.1). L'acqua evaporata ricade sulla terra sotto forma di precipitazione e si infila nel sottosuolo proseguendo il suo cammino sottoterra fino a che non riemerge in sorgenti o non viene estratta dall'uomo tramite pozzi.

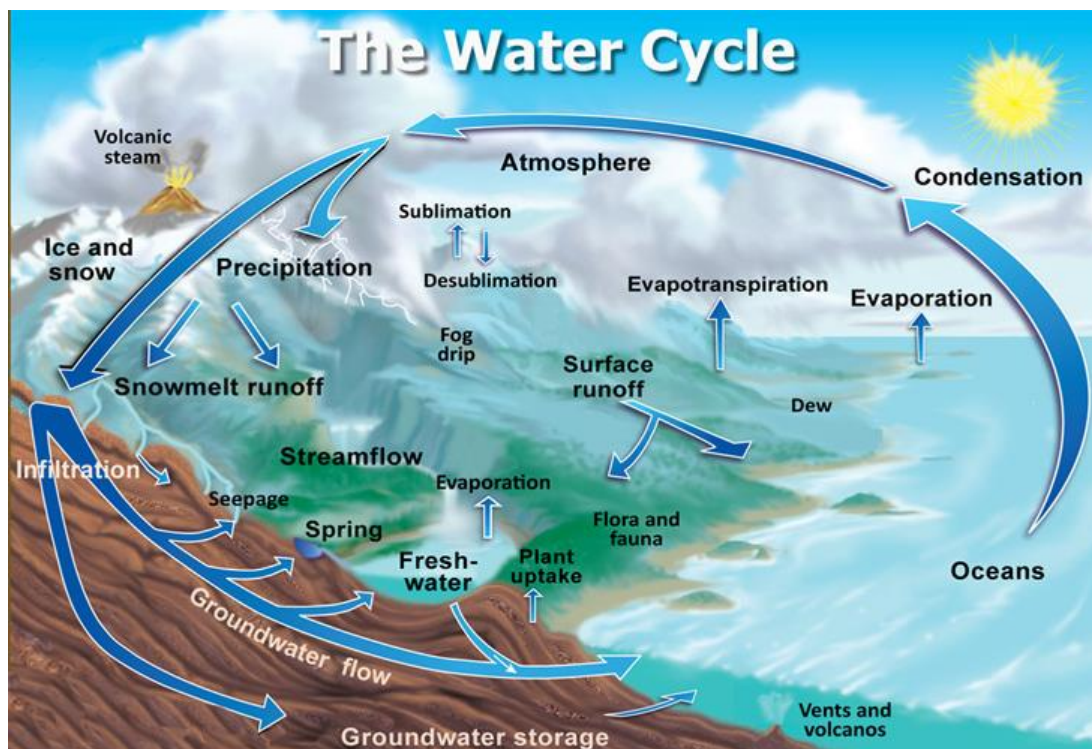


Figura 1.1 Ciclo idrologico dell'acqua.

Parte dell'acqua piovana e parte dell'acqua trasportata dai fiumi si infiltra nel sottosuolo. Essa penetra in profondità, fino a raggiungere un livello di suolo impermeabile, andando a costituire degli accumuli di acqua sotterranea (falda) contenuta negli spazi vuoti (pori e fratture) del sottosuolo. La porzione di acqua meteorica che non evapora e non si infiltra è detto *runoff* e va ad alimentare direttamente fiumi e/o oceani.

Il suolo è formato per circa il 50% del suo volume da particelle solide di varia natura, forma e dimensione; mentre il restante 50% è composta dalla porosità occupata da liquidi e/o gas. L'acqua in un suolo è presente in tutte e tre le sue forme, anche se la forma predominante è quella liquida, detta anche *soluzione circolante*. Il suolo quindi partecipa attivamente alla quantificazione del bilancio idrico, influenzando l'evaporazione, la percolazione, l'infiltrazione, ecc...

Il contenuto idrico in un suolo varia da un contenuto massimo (capacità idrica massima) ossia la quantità di acqua che un suolo è in grado di contenere, a uno minimo, definito come acqua residua; parametri fondamentali che vanno a rappresentare un terreno.

La zona vadosa, caratterizzata da alternanza tra fasi di saturazione e parziale insaturazione idrica, è quello maggiormente interessato da attività biologica ed è sede dei fenomeni di evapotraspirazione, percolazione, *runoff*. Dal momento che la zona vadosa si sviluppa lungo il profilo dell'insaturo, la sua estensione dipende dalla profondità della falda freatica, la cui profondità può variare da alcune decine di centimetri a decine di metri. Il confine tra la zona satura e insatura è segnata dalla tavola d'acqua.

1.3 Le cover crops

Per affrontare i problemi legati alla degradazione delle acque e del suolo nei sistemi agroambientali, negli ultimi anni sono state proposte diverse tecniche gestionali che mirano alla conservazione dell'ambiente senza, d'altro canto, dover rinunciare alle elevate produzioni agricole. Tra queste tecniche, hanno acquisito un particolare risalto quelle che prevedono una copertura continuativa del suolo tramite *cover crops*.

Le *cover crops*, o colture di copertura, sono colture seminate in periodi e spazi non destinati alla raccolta (periodi di riposo) che hanno lo scopo di mantenere il terreno

scoperto il minor tempo possibile. La presenza di terreno nudo soprattutto nelle stagioni autunno-invernali particolarmente ricche di piogge aumentano le possibili perdite di suolo fertile dovute principalmente all'erosione idrica e, in misura minore, a quella eolica; per di più si verificano perdite per lisciviazione di elementi nutritivi mineralizzati, azoto in particolare. Quindi la presenza di una coltura in campo limita notevolmente tali perdite, attenuando la forza battente della pioggia e l'effetto di scorrimento dell'acqua (gli effetti dell'impatto della pioggia e del vento vengono ridotti dal 50 % al 90%)

Queste perdite possono creare impoverimento del suolo e contaminazione delle falde acquifere sottostanti. Una coltura in campo durante tali stagioni è in grado di limitare le perdite grazie all'utilizzo degli elementi nutritivi e la loro trasformazione in forma organica (biomassa) che rende i nutrienti più stabili e disponibili per le colture successive.

Il periodo invernale è normalmente anche la parte dell'anno in cui avviene maggiore percolazione dell'acqua e il terreno si presenta pressoché umido a causa della bassa evapotraspirazione e da consistenti precipitazioni. I nutrienti della pianta disponibili nel terreno possono quindi essere lisciviati verso il basso con acqua percolante e alla fine si perdono oltre la zona radicale.

La presenza di un fitto apparato radicale che si distribuisce uniformemente, e più o meno in profondità a seconda delle specie, migliora le caratteristiche strutturali del suolo, così che l'azione meccanica delle radici varia in base alle diverse specie a seconda del grado di sviluppo degli apparati radicali (ramificati e profondi).

Va detto inoltre che le *cover crops* non sono comparabili alle capacità di un prato poliennale, ma il risultato è sempre un aumento della porosità e della capacità di trattenere l'acqua; in aggiunta hanno un'importante funzione nella prevenzione dello sviluppo delle erbe infestanti (con l'impiego di specie a rapido sviluppo o per effetto allelopatico si inibisce lo sviluppo delle infestanti e la loro moltiplicazione).

1.3.1 Il legume con l'azoto

Le colture di copertura sono coltivate per molti scopi, ma la maggior parte dell'interesse si è concentrato sui loro effetti legati all'azoto. Negli ultimi 30 anni, l'uso dell'azoto

minerale per fertilizzare le colture è in crescita ma, parallelamente, è sorto anche il problema dell'inquinamento da nitrati nelle acque superficiali e sotterranee.

Il nitrato perso dall'agricoltura, infatti, causa due tipi di problemi ambientali: un aumento della concentrazione di nitrati nelle falde acquifere più profonde utilizzate per l'estrazione di acqua potabile e un aumento della concentrazione di nitrati nelle acque superficiali (corsi d'acqua, laghi e acque costiere). Questo può portare a eutrofizzazione con vari effetti negativi a livello ecosistemico.

Alcuni accorgimenti su come limitare la perdita di nitrati nelle falde acquifere riguardano le direttive europee a favore delle *Best Management Practices* (BMPs) per la protezione del suolo e delle acque, promuovendo inoltre la riduzione della fertilizzazione azotata organica e minerale nei terreni.

Sono stati fatti studi su come catturare l'N nei terreni coltivati per prevenire le perdite per lisciviazione nell'ambiente, altri esperimenti hanno mirato a ottenere una comprensione più basilare degli effetti delle colture di copertura. La coltura di copertura blocca il dilavamento dell'azoto e può recuperare gli elementi minerali negli strati più profondi.

Un'efficiente *cover crop* può ridurre la perdita di azoto per più dell'80%. In questo caso si usa chiamarla anche *catch crop*, o coltura trappola, perché assorbe gli elementi nutritivi che verranno lentamente ceduti alla coltura successiva. Una *cover crop* che viene terminata con il sovescio, ha la possibilità di apportare azoto organico in quantità anche notevoli.

1.4 *Raphanus sativus* var. *longipinnatus*: effetto dell'apparato radicale sulle dinamiche idrogeologiche acqua-suolo

Raphanus sativus L. var. *longipinnatus* L.H. Bailey, noto commercialmente con il nome di daikon, è una varietà del ravanella comune originaria dell'Asia orientale. Si tratta di una pianta che ha subito una trasformazione da parte dell'uomo attraverso un processo di selezione selettiva per i propri usi.

Dal punto di vista botanico appartiene alla famiglia delle *Brassicaceae* e si tratta di una pianta erbacea annuale o biennale con portamento eretto. La radice è



Figura 1.2 A sinistra i buchi lasciati nel terreno dalle radici del rafano, a destra le radici a fittone di *Raphanus sativus* L. var. *longipinnatus* L.H. Bailey.

morfologicamente paragonabile a quella di una carota, però dalla colorazione biancastra, che raggiunge lunghezze di norma pari a 20-35 cm, con un diametro di 5 cm. La polpa della radice è carnosa, mentre il sottile rivestimento esterno risulta lucido (Figura 1.2). La grossa radice fuoriesce parzialmente dal suolo (Figura 1.3).



14

Figura 1.3 Radice a fittone con relativo apparato fogliare.

Le foglie sono lobate, con un lobo terminale più grande e arrotondato e segmenti inferiori più piccoli accoppiati; la fioritura avviene intorno ad aprile, producendo fiori dalla colorazione biancastra formati da quattro petali che si sviluppano fino a 90 cm di altezza.

I fattori che incidono sulla qualità della pianta riguardano l'umidità e la temperatura; in presenza di un buon contenuto d'acqua e temperature medio-basse la pianta si sviluppa piuttosto bene, rigogliosa, folta nell'apparato epigeo e con un buon sviluppo dell'apparato radicale. Viceversa in condizioni di scarsa umidità e temperature eccessive, la radice risulta dura e legnosa. Per queste caratteristiche risulta un'ottima *cover crop* da utilizzare nel periodo autunno-invernale.

Il terreno più adatto alla sua coltivazione è quello lavorato in profondità e possibilmente ricco di sostanza organica ben decomposta, in assenza di ristagni idrici.

L'apparato radicale del rafano ha una maggiore capacità a penetrare nel terreno compattato migliorando la struttura del terreno, ma ciò potrebbe causare problemi legati alla lisciviazione dei composti verso la falda. Vari studi mettono comunque in evidenza la capacità del rafano di porre un freno alla lisciviazione dell'azoto, agendo con l'apparato radicale fino oltre la profondità di 1,5 m (Kristensen e Thorup-Kristensen, 2004; Thorup-Kristensen *et al*, 2003).

Alcuni studi suggeriscono che il rafano può essere utilizzato come alternativa biologica allo strappo profondo e altri metodi meccanici per alleviare la compattazione del suolo (Gruver *et. al*, 2016)

1.5 Scopo della tesi

Il sottosuolo contiene una risorsa idrica importantissima che va conservata, protetta e utilizzata in modo razionale. Vista la presenza di falde superficiali nella zona della bassa pianura veneta e considerata l'importanza nel settore agricolo della zona d'interesse, con il presente lavoro si intende studiare, nel breve periodo, come una specifica *cover crop* autunno-invernale, il *Raphanus sativus* L. var. *longipinnatus* L.H. Bailey, interferisce nel terreno modificandone le proprietà idrauliche e la capacità di trasporto degli

inquinanti. Da un lato l'apparato radicale della pianta potrebbe sopperire, almeno nello strato superficiale, alla mancanza di lavorazioni tipiche di tecniche agronomiche conservative, riducendone, per esempio, il compattamento, ma dall'altro potrebbe causare la formazione di vie preferenziali alla percolazione profonda dell'acqua, e dei soluti in essa disciolti, che potrebbe incrementare l'inquinamento della falda ipodermica durante i periodi di concimazione.

2. MATERIALI E METODI

2.1 La prova sperimentale

I dati oggetto d'analisi sono stati raccolti da una prova sperimentale in corso presso l'azienda agraria sperimentale "Lucio Toniolo" dell'Università di Padova, situata in comune di Legnaro (PD), nel periodo 27 marzo-21 aprile 2017. Tale prova usufruisce di una batteria di 20 lisimetri interrati, di cui 12 utilizzati per il presente lavoro, con superficie in corrispondenza del piano di campagna, ciascuno avente area superficiale di 1 m² e profondità di 1.5 m.

Tutti i lisimetri contengono un terreno franco-limoso fino a 130 cm di profondità (tabella 2.1) classificato come Fluvi-Calcaric Cambisol secondo il World Reference Base for Soil Resources (FAO-UNESCO, 1990), ampiamente rappresentativo dei suoli della bassa pianura veneta, estendendosi infatti per circa il 50% della stessa (circa 421.000 ha).

Proprietà chimiche del suolo	Profondità 0-140 cm
Sabbia (%)	35
Limo (%)	48
Argilla (%)	17
pH	8.1
Azoto Totale (%)	10
Carbonio Organico (%)	0.9
Sostanza Organica (%)	1.5
C/N	7.4
Carbonati totali (%)	20.1
Carbonati solubili (%)	4.1
Salinità (mS cm ⁻¹)	0.28
P disponibile (mg Kg ⁻¹)	9
H scambiabile (mg Kg ⁻¹)	128

Tabella 2.1 Proprietà chimico-fisiche del suolo contenuto nei lisimetri.

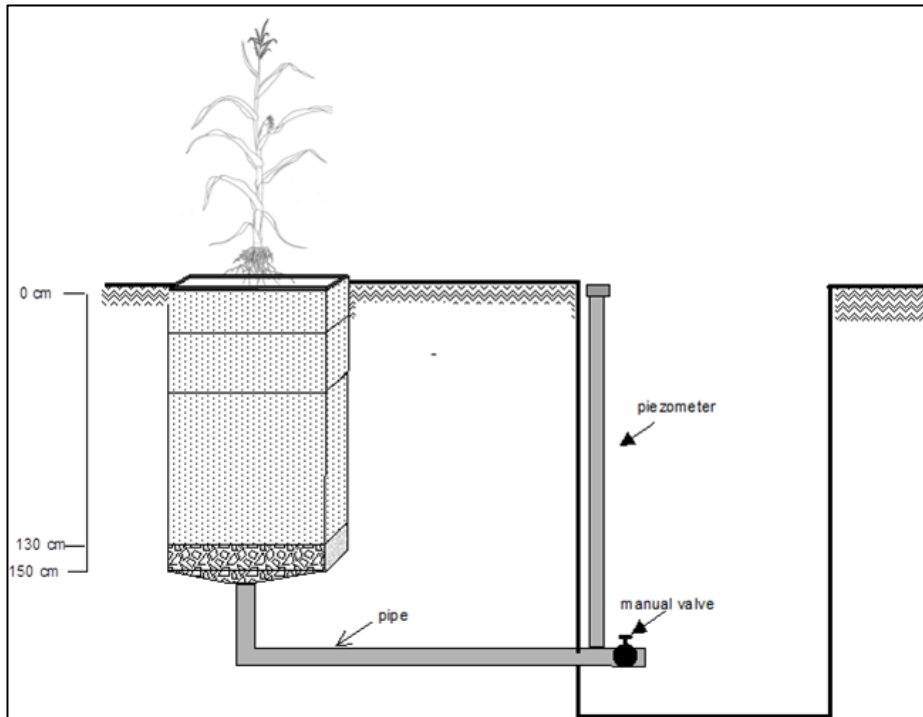


Figura 2.1 Schema del lisimetro a drenaggio.



Figura 2.2 Il sito della prova sperimentale

Il fondo del lisimetro è riempito di ghiaia negli ultimi 20 cm per consentire un buon drenaggio delle acque di percolazione.

Sempre sul fondo del lisimetro la presenza di una condotta sotterranea permette la rimozione delle acque drenanti in eccesso consentendone, tramite collegamento a una valvola, la raccolta e quindi il campionamento. La connessione del lisimetro, tramite

condotta sotterranea, a un piezometro fenestrato, permette inoltre di misurare l'altezza della falda all'interno del lisimetro stesso e mantenerne un'altezza costante, sia tramite la ricarica della falda che favorendone il drenaggio (Figura 2.1).

Per mantenere gli apporti irrigui controllati e proteggere le colture dal danneggiamento, l'intero sito è dotato di una tettoia scorrevole che viene azionata in caso di pioggia o grandine (Figura 2.2). Grazie a questo sistema di copertura è possibile controllare l'afflusso degli apporti idrici meteorici sui lisimetri.



Figura 2.3 Lisimetro in assenza di coltura di copertura.



Figura 2.4 Lisimetro con *Raphanus sativus* L. var. *longipinnatus* L.H. Bailey.

I dodici lisimetri presenti nell'area sperimentale sono stati così suddivisi: sei privi di coltura (terreno nudo) (Figura 2.3) e sei coltivati con *Raphanus sativus* L. var. *longipinnatus* L.H. Bailey (Figura 2.4). La densità di semina del *R. sativus* è di 40 piante/m². Tutti i lisimetri sono stati fertilizzati con nitrato d'ammonio (NH₄NO₃) (30 kg N/ha).

L'apporto idrico è avvenuto perlopiù mediante irrigazione manuale, di fatto controllando le precipitazioni naturali in automatico attraverso l'apertura e la chiusura del capannone. Nei lisimetri sono stati mantenuti costanti i livelli di falda durante tutto l'arco della prova. In particolare, quattro lisimetri (due con coltura e due senza) sono stati mantenuti a drenaggio libero, cioè in assenza di falda (sigla "FD"), quattro con falda ipodermica a 120 cm di profondità dal piano campagna (sigla "WT120") e quattro con falda ipodermica a 60 cm di profondità dal piano campagna (sigla "WT60"). La regolazione del livello di falda è stata condotta giornalmente. Da protocollo, la fluttuazione massima consentita del livello è stata di ± 10 cm.

I fattori oggetto di studio sono stati quindi il tipo di coltura (x 2) e il livello di falda (x 3), combinati secondo un disegno fattoriale con due ripetizioni a distribuzione completamente randomizzata. I trattamenti considerati sono dunque sei, replicati due volte.

2.1.1 L'impianto automatizzato

Le dinamiche del sistema acqua-suolo riprodotte nel sito sperimentale sono state costantemente monitorate per comprendere i flussi di entrata e di uscita dell'acqua attraverso il sistema.

Un sistema di monitoraggio automatico è installato nei dodici lisimetri oggetto di studio (Figura 2.5) ed è composto dai seguenti sensori:

- sonde per la misurazione dell'umidità volumetrica;
- tensiometri elettronici;
- sonde di temperatura;
- microlisimetri a suzione.

Tutta la strumentazione è stata collegata, tramite tre multiplexer, a un datalogger CR-10X (Campbell Sci. Inc., Lincoln Nebraska – USA) per poter monitorare in maniera automatica e continuativa lo stato del suolo (Figura 2.6).

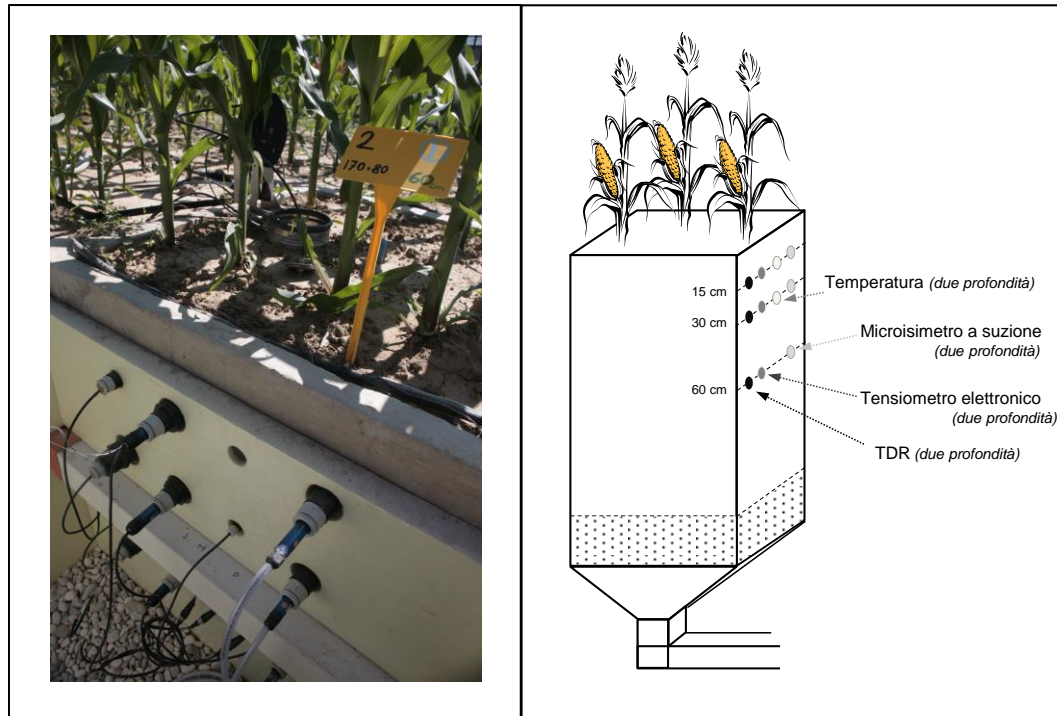


Figura 2.5 Disposizione delle sonde nelle diverse profondità (sinistra) e schema progettuale della loro disposizione in campo (destra).

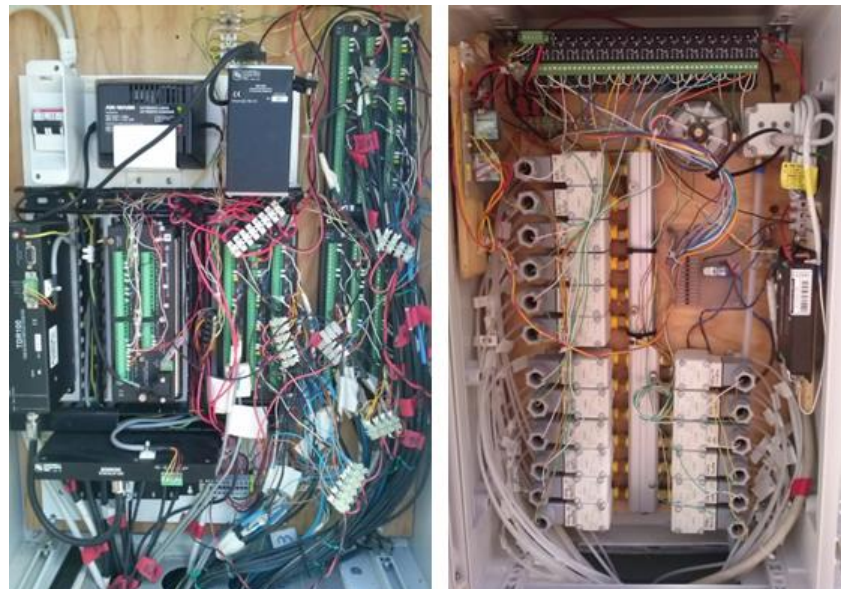


Figura 2.6 Impianto automatizzato costituito da multiplexer e *datalogger* CR-10X per il monitoraggio del suolo (a sinistra) e elettrovalvole per il campionamento della soluzione circolante (a destra).

Ciascun lisimetro è dotato di tre sonde per la misurazione dell'umidità volumetrica del suolo (sonde CS635, tecnologia TDR/Time Domain Reflectometry, Campbell Sci. Inc., Lincoln Nebraska – USA) (Figura 2.7). Le sonde sono state poste alle profondità di 15, 30 e 60 cm.

Le sonde TDR misurano la costante dielettrica nel suolo (K_a), la quale è, a sua volta, funzione del grado di umidità del suolo. Una buona calibrazione permette di stabilire

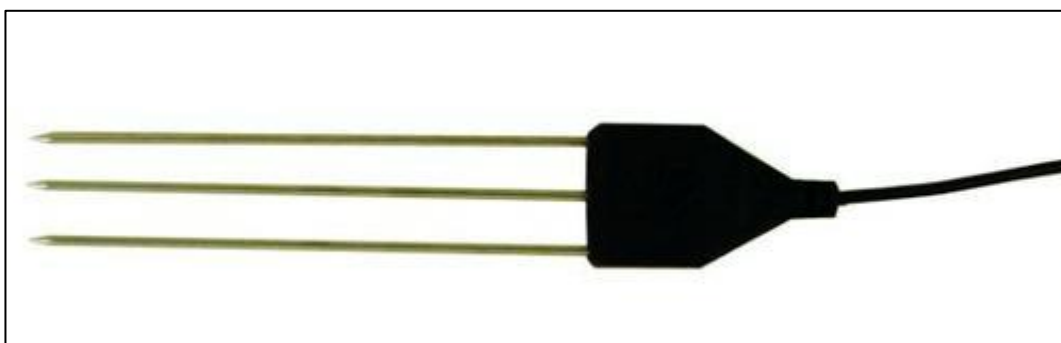


Figura 2.7 Sonde TDR.

con precisione il contenuto idrico volumetrico.

La relazione tra costante dielettrica (K_a) e umidità del suolo (VWC) è descritta dalla equazione (1), ottenuta mediante procedura di calibrazione avvenuta in laboratorio prima della messa in campo (Figura 2.8):

$$\text{VWC} = 0.187 \cdot \ln(K_a) - 0.167 \tag{1}$$

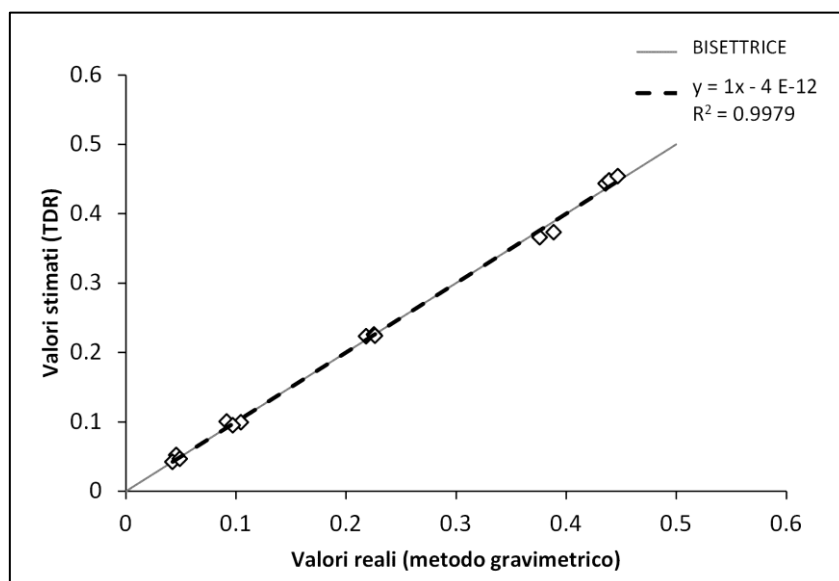


Figura 2.8 Retta di calibrazione per le sonde TDR determinata in laboratorio.

Alle stesse profondità delle sonde TDR sono stati posizionati tre tensiometri elettronici per la misurazione del potenziale matriciale del suolo, cioè la forza con cui l'acqua è attratta e trattenuta dal terreno (sonde T4e, UMS GmbH, Monaco - Germania) (Figura 2.9).

Lo strumento formato da un tubo con una punta porosa va riempito d'acqua e infilato nel suolo. Se il terreno è saturo d'acqua, l'acqua all'interno non scenderà e lo strumento misurerà il valore "zero".



Figura 2.9 Descrizione schematica dei tensiometri elettronici T4e.

Le sonde di temperatura (sensori termocoppia) sono due per ogni lisimetro, poste alle profondità di 15 e 30 cm (Campbell Sci. Inc., Lincoln Nebraska – USA).

Infine, tre microlisimetri a suzione (SPE-20, UMS GmbH, Monaco - Germania) (Figura 2.10), posizionati alle profondità di 15, 30 e 60 cm, sono stati utilizzati per il

campionamento automatizzato della soluzione circolante nel terreno, sulla base dei valori di potenziale matriciale misurati con i tensiometri elettronici.

Le coppe porose sono costruite in polietilene/nylon, materiale adatto a campionare i nitrati, fosfati e sostanza organica disciolta in acqua.

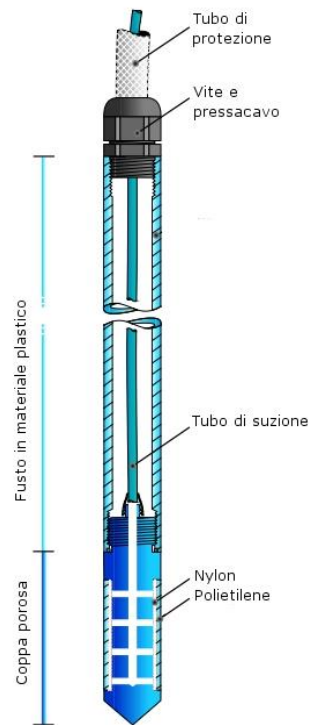


Figura 2.10 Descrizione schematica dei microlisimetri a suzione SPE-20.

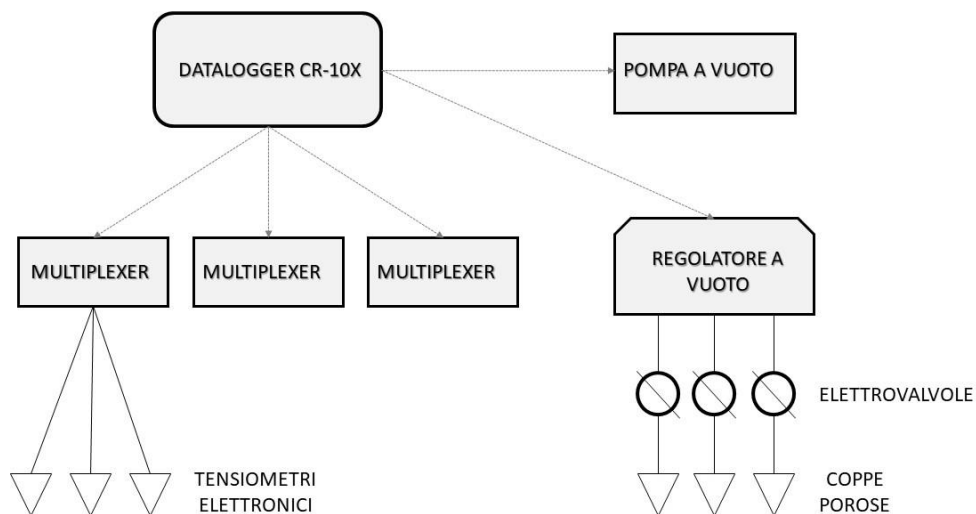


Figura 2.11 Disegno progettuale del sistema automatizzato per il campionamento dell'acqua della soluzione circolante.

A intervalli stabiliti dall'utente, il sistema automatizzato attiva una pompa a vuoto per campionare l'acqua del terreno; la pompa a vuoto, quindi, tramite un sistema di elettrovalvole, pone in depressione le coppe porose a un livello di vuoto che viene modulato, tramite un regolatore di pressione, sulla base del gradiente naturale di potenziale idrico (Figura 2.11). In questo modo il sistema permette di campionare in maniera selettiva l'acqua circolante nel profilo e di studiare i fenomeni di lisciviazione e risalita dei nutrienti.

I volumi di acqua di percolazione sono stati misurati manualmente mediante pesatura, con una risoluzione di 10 g.

2.1.2 Movimento dei soluti

Per studiare il movimento dei soluti contenuti nella soluzione circolante è stata effettuata una prova utilizzando un tracciante al bromo, nello specifico bromuro di potassio (KBr). Lo ione bromuro (Br^-) è un tracciante conservativo e non reattivo.

Il giorno 27 marzo 2017 sono stati distribuiti con un evento irriguo di 10 mm (10 L/m^2), 10 g di KBr per lisimetro, corrispondenti ad una concentrazione di 1 g/L.

A partire da tale data, la soluzione circolante è stata campionata mediante l'uso dei microlisimetri a suzione, giornalmente per le prime due settimane, poi la terza settimana sono stati campionati a giorni alterni. La prova è terminata il 21 aprile 2017.

L'acqua campionata è stata conservata in congelatore a -20°C prima di essere analizzata mediante una sonda dotata di un elettrodo selettivo per la rilevazione di Br^- .

Lo strumento utilizzato per l'analisi dello ione bromuro (pH & Ion-Meter GLP 22, CRISON INSTRUMENTS, S.A.) è fornito di due canali per la misurazione di pH e concentrazioni ioniche con elettrodi ione-selettivi (Figura 2.12 e 2.13).



Figura 2.12 Strumentazione per l'analisi dello ione bromuro.

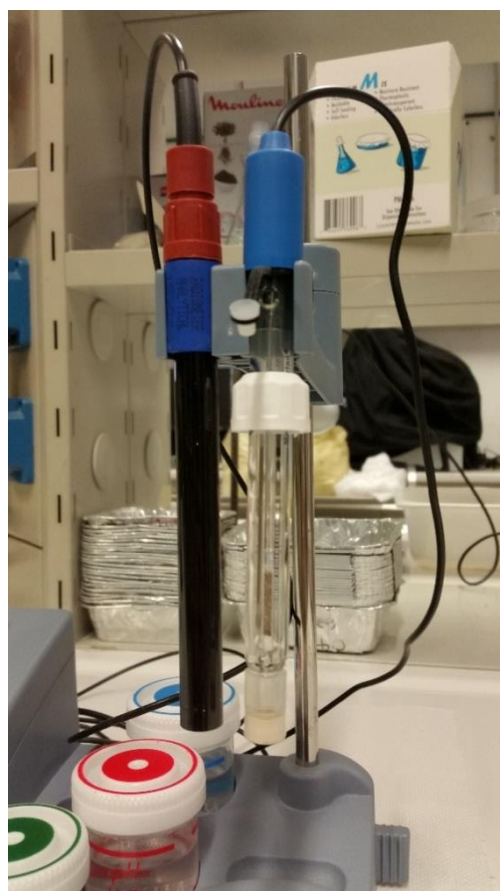


Figura 2.13 Elettrodo selettivo dello ione bromuro (a sinistra) e elettrodo di riferimento (a destra).

L'elettrodo selettivo è destinato alla misurazione delle concentrazioni dello ione bromuro (mol/L). La membrana selettiva, posta nella parte inferiore dell'elettrodo, non richiede il rabbocco con elettrolita interno. È un elettrodo indicatore che deve sempre operare con un elettrodo di riferimento.

Prima di utilizzare lo strumento è necessario calibrarlo mediante la preparazione delle soluzioni standard a diverse concentrazioni di Br^- , diluendo la soluzione standard "madre" con acqua deionizzata. Gli standard devono coprire le concentrazioni che ci si aspetta trovare nei campioni da analizzare.

Per la calibrazione dello strumento è stato necessario avvalersi di una serie di soluzioni, di seguito riportate:

- elettrolita per elettrodo di riferimento LiCH_3COO 0,1 M, codice 99 01;
- aggiustatore di forza ionica, NaNO_3 5M.

Preparazione: pesare 42.5 g di NaNO_3 e sciogliere in acqua deionizzata in un matraccio da 100 ml e poi portare a volume sempre con acqua deionizzata;

- soluzione standard "madre" di bromuro (0.1 mol/L Br^- o 1 g/L Br^-).

Preparazione: pesare 11.9 g di KBr per la soluzione 0.1 mol/L o 1.489 g per 1.0 g/L di Br^- e sciogliere in acqua deionizzata in un matraccio da 1000 ml e portare a volume.

Sono quindi state preparate cinque soluzioni a titolo noto:

1. 10 μL \rightarrow 10^{-5} M;
2. 100 μL \rightarrow 10^{-4} M;
3. 1 mL \rightarrow 10^{-3} M;
4. 10 mL \rightarrow 10^{-2} M;
5. 100 mL \rightarrow 10^{-1} M.

Tutte portate a volume a 100 ml. Con le soluzioni a titolo noto si è calibrato lo strumento.

2.2 L'approccio modellistico

2.2.1 Hydrus-1D

Il software Hydrus-1D (Simunek *et al.*, 2009) è un modello idraulico di simulazione unidimensionale (1-D) del flusso variabile dell'acqua nel terreno insaturo, il movimento del calore e del trasporto di soluti. L'equazione che governa il flusso di acqua è espressa mediante l'equazione di Richards (3):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} + K \right) \quad (3)$$

dove:

- θ è il contenuto volumetrico d'acqua (cm^3/cm^3);
- h è il potenziale di pressione (cm);
- z è la coordinata spaziale (cm). In questo caso abbiamo un'unica coordinata poiché si simula il movimento dell'acqua lungo la verticale, cioè si studia il movimento dell'acqua nell'1D;
- t è il tempo (d= giorni);
- K è la conducibilità idraulica ai diversi potenziali (cm/d).

Grazie al processo di modellazione inversa, Hydrus-1D consente inoltre di stimare le caratteristiche fisico-idrauliche del suolo partendo dall'osservazione dei risultati da esse determinati. È opposta ai modelli diretti, per cui la soluzione implica la ricerca degli effetti sulla base della descrizione degli effetti prodotti.

In questo caso, il metodo dell'inversione viene utilizzato per risolvere l'equazione di Richards, minimizzando lo scarto tra variabili osservate in campo (l'umidità del suolo) e le stesse ottenute dal modello.

Il modello inverso va a minimizzare la seguente funzione obiettivo (4), che descrive la discrepanza tra i valori attesi e i valori osservati:

$$\emptyset(b, p) = \sum_{j=1}^m v_j \sum_{i=1}^{n_j} w_{i,j} [p_j * (t_i) - p(t_i, b)]^2 \quad (4)$$

dove m rappresenta i differenti set di dati misurati, n_j è il numero di dati misurati sperimentalmente, $p_j^*(t_i)$ sono le misure specifiche al tempo t per un dato set di misure, $p_j(t_i, b)$ sono le corrispondenti previsioni del modello per il vettore dei parametri ottimizzati b (es. umidità a saturazione, conducibilità ecc.) e v_j e $w_{i,j}$ sono i pesi associati a un particolare set di misure.

Tale funzione descrive la discrepanza tra i valori osservati e i valori attesi. La minimizzazione della funzione obiettivo, quindi, permette di ottenere la massima vicinanza tra i valori descritti dall'esperienza e i valori simulati.

Le caratteristiche del suolo, ricostruite grazie all'interpretazione dei risultati attesi con il metodo dell'inversione, sono state descritte per quanto riguarda la curva di ritenzione secondo il modello di Van Genuchten (1980) e, per la conducibilità idraulica, secondo il modello di Mualem (1976). L'equazione di Van Genuchten (5) e (6) è la seguente:

$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (5)$$

dove:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

S_e rappresenta il grado di saturazione ($0 \leq S_e \leq 1$), θ_r e θ_s rappresentano rispettivamente il contenuto idrico a saturazione e il contenuto idrico residuo; mentre α , n , m ($m = 1 - 1/n$) sono parametri empirici che descrivono la forma della curva di ritenzione. In particolare $1/\alpha$ viene generalmente considerato come il potenziale di entrata dell'aria, mentre n determina la pendenza della curva.

Il modello di Mualem (7) per la conducibilità idrica è invece il seguente:

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[\frac{f(S_e)}{f(l)} \right]^2 \quad (7)$$

Dove S_e rappresenta il grado di saturazione, K_s la conducibilità idraulica del saturo ed l la connettività e tortuosità del suolo.

2.2.2 Caratterizzazione idraulica del suolo con Hydrus-1D: l'inversione

Il suolo dei diversi lisimetri è stato caratterizzato per tre diversi strati; il primo corrispondente al profilo 0-15 cm, supposto come strato lavorato, il secondo strato 15-30 cm e il terzo 30-140 cm, ovvero gli strati non lavorati. La divisione del suolo in tre strati arbitrari è dovuta alla presenza delle tre sonde CS635 tecnologia TDR così si è consentito di effettuare inversioni modellistiche migliori rispetto alla scelta di suddividere il suolo in due parti.

I dati di umidità ricavati alle diverse profondità (15 cm, 30 cm e 60 cm) sono stati utilizzati per descrivere le caratteristiche fisico-idrauliche del suolo.

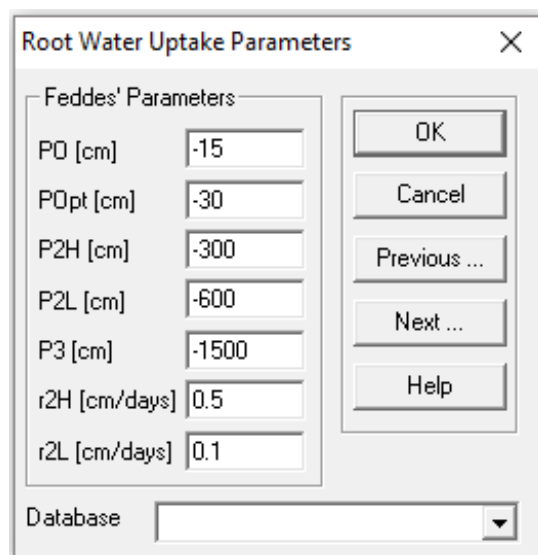
Per la procedura di inversione sono stati utilizzati i dati medi giornalieri misurati dal 23 marzo 2017 e il 21 aprile 2017.

Le condizioni atmosferiche al contorno inserite nel modello riguardavano il numero e la quantità delle precipitazioni e irrigazioni effettuate, l'altezza di falda e infine l'evapotraspirazione potenziale (ET_0), stimata mediante il prodotto tra l'ET di riferimento (equazione di Hargreaves su dati provenienti da stazione meteorologica posta nel sito sperimentale) e il coefficiente colturale (K_c) che descrive lo sviluppo di *Raphanus sativus*:

- $K_c = 0,3$ in assenza di coltura;
- $K_c = 0,85$ durante il periodo di massimo sviluppo della pianta.

Nonostante la rappresentatività delle condizioni di campo del sito sperimentale, si è osservata una certa variabilità microclimatica dovuta alla presenza della tettoia scorrevole, che genera fenomeni di advezione con un incremento. Di conseguenza, è stato necessario dotare il sito sperimentale di una stazione meteorologica i cui dati, confrontati con quelli forniti dalla stazione ARPAV di Legnaro, hanno permesso di considerare il flusso advettivo, tarando il modello di Hargreaves.

La risposta di *Raphanus sativus* agli stress idrici viene descritta in Hydrus-1D secondo il modello di Feddes (Feddes *et al.*, 1978) (Figura 2.14). Nel modello non si è tenuto conto dello sviluppo radicale dato che l'apparato radicale della specie utilizzata era già ben sviluppato, stabilizzandosi poi a 80 cm di profondità nei casi di presenza di falda a 120 cm e con drenaggio libero, e a 60 cm con tavola d'acqua alla stessa profondità.



Feddes' Parameters	
P0 [cm]	-15
P0pt [cm]	-30
P2H [cm]	-300
P2L [cm]	-600
P3 [cm]	-1500
r2H [cm/days]	0.5
r2L [cm/days]	0.1

Database

Figura 2.14 Parametri standard del modello di Feddes.

2.2.3 Hydrus-1D: movimento dei soluti

Hydrus-1D è stato utilizzato per caratterizzare anche il movimento dei soluti lungo il profilo del terreno. Tramite il metodo dell'inversione, il software ha permesso di simulare sia il movimento del bromuro nel profilo e, quindi, di stimare i parametri di trasporto dei soluti sulla base delle dinamiche di lisciviazione osservate in campo. Nello specifico, si è potuto determinare:

1. la costante di ripartizione suolo-acqua del soluto (8)

$$K_d = A_s/A_a \quad (8)$$

dove A_s è la massa di soluto/massa di suolo all'equilibrio, mentre A_a è la massa di soluto/volume di acqua all'equilibrio;

2. la dispersività longitudinale (D_z), ovvero la dispersione del soluto lungo la direzione principale del flusso (cm).

Il trasporto dei soluti è stato descritto dall'equazione di convezione e dispersione (CDE) (9):

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial v \theta C}{\partial z} \quad (9)$$

dove C è la concentrazione del soluto (mg/l), D il coefficiente di dispersione (cm^2/d) e v la velocità media del flusso nei pori (cm/d).

Infine il coefficiente di dispersione (10) è definito come:

$$D = D_z |v| \quad (10)$$

dove D_z è la dispersività.

I dati sperimentali utilizzati per invertire il modello sono stati le concentrazioni di Br^- lungo il profilo, i parametri della curva di ritenzione precedentemente stimati secondo il modello di Van Genuchten, la densità apparente del terreno e la diffusività del bromuro in acqua ($1,2968 \text{ cm}^2/\text{d}$).

L'inversione in presenza di bromuro è stata effettuata per il periodo 23 marzo 2017 – 21 aprile 2017.

3. RISULTATI

3.1 Sperimentazione di campo

3.1.1 Dati meteorologici

Durante il periodo di prova, 23 marzo e il 21 aprile 2017, l'andamento meteorologico è stato caratterizzato da una temperatura media giornaliera oscillante tra un massimo di 17,8 °C e un minimo di 8,4 °C, quest'ultimo dato osservato negli ultimi giorni della prova, periodo in cui le temperature minime sono scese a valori prossimi ai 2 °C (Figura 3.1). Le temperature massime, che hanno superato i 25 °C, sono state invece osservate nella prima parte della prova, tra fine marzo e inizio aprile.

Nel periodo analizzato si sono verificate sporadiche precipitazioni, con un picco in data 4 aprile 2017 di circa 12 mm (Figura 3.1). In totale sono piovuti circa 39 mm, mentre l'apporto irriguo distribuito manualmente con cadenza pressoché giornaliera è stato di 250 mm.

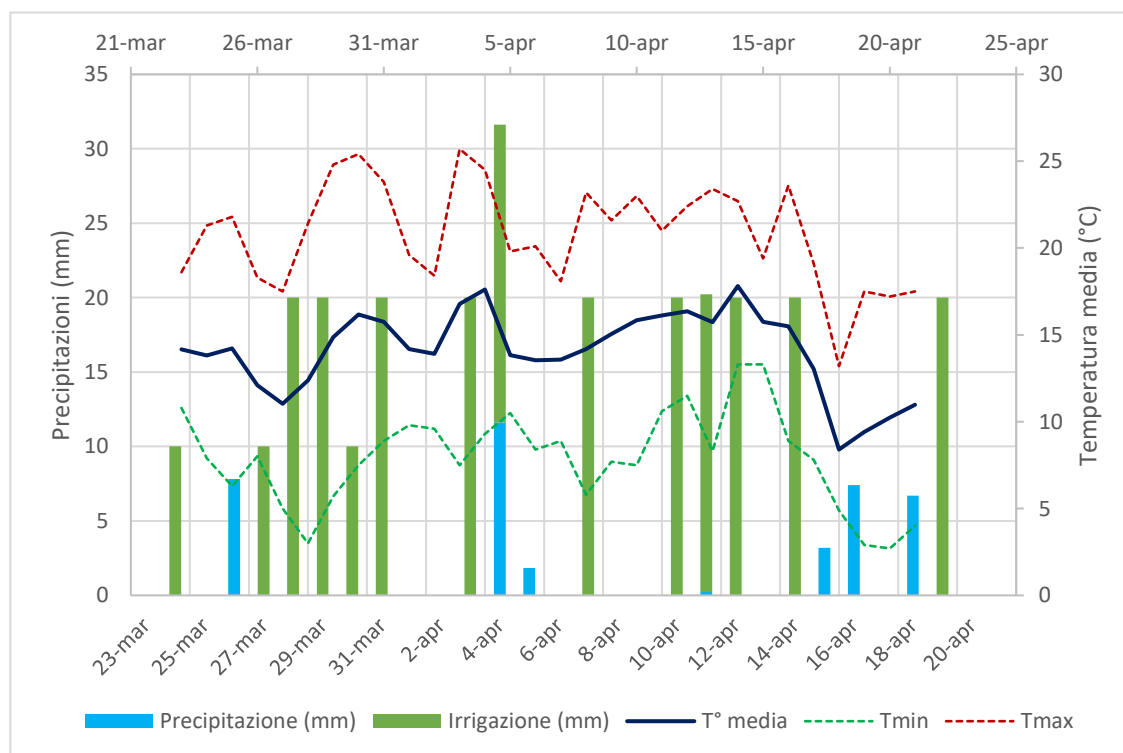


Figura 3.1 Confronto tra temperatura media, minima e massima (in °C) nel periodo compreso tra 23 marzo e 21 aprile 2017. Sono inoltre raffigurate le precipitazioni e il contenuto d'acqua apportato mediante irrigazione nello stesso periodo (in mm).

Una stima dell'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) è stata effettuata utilizzando l'equazione di Hargreaves (Figura 3.2). In Tabella 3.1 sono riportati alcuni valori della ET_0 stimata con tale equazione:

ET_0 totale (mm)	ET_0 massima (mm/giorno)	ET_0 minima (mm/giorno)	ET_0 media (mm/giorno)
98,91	4,17	2,27	3,30

Tabella 3.1 Valori di ET_0 nel breve periodo 23 marzo – 21 aprile 2017.

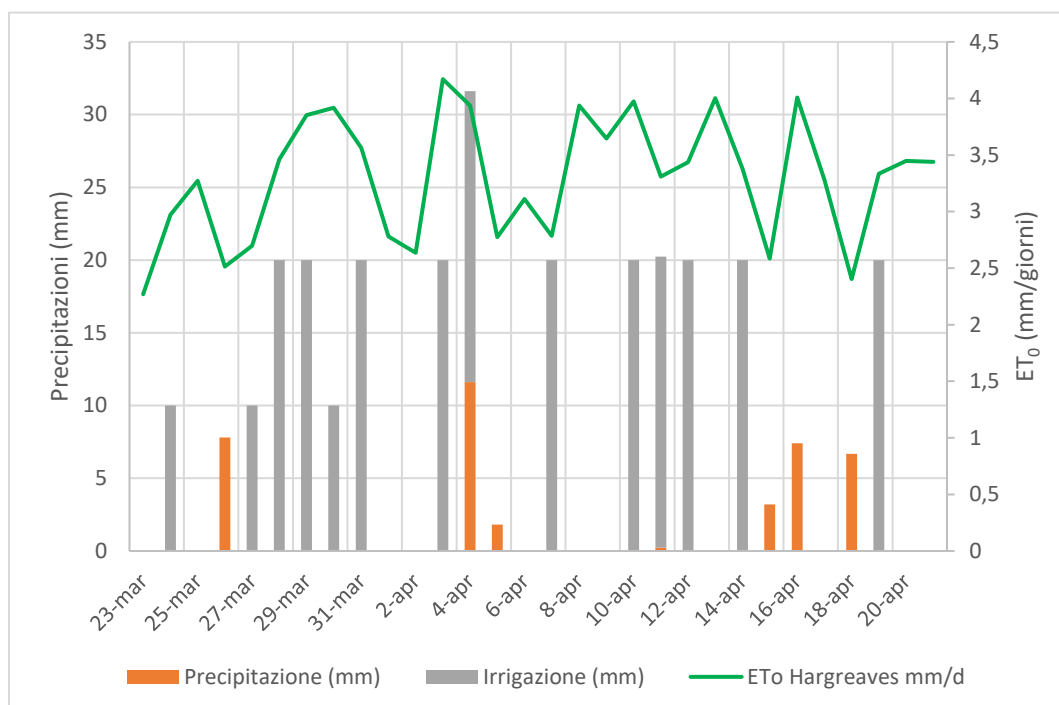


Figura 3.2 Andamento dell'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) nel periodo 23 marzo – 21 aprile 2017.

3.1.2 Monitoraggio del suolo

Durante il periodo della prova il piano di monitoraggio ha previsto una misura automatizzata (regolata da un datalogger) dell'umidità del suolo con cadenza semi-oraria.

Le altezze di falda sono state misurate giornalmente attraverso la lettura dei piezometri connessi ai singoli lisimetri e le stesse sono state poi regolate secondo le indicazioni dello schema sperimentale: quattro lisimetri con falda libera (FD), quattro con una falda posta a 60 cm di profondità (WT60) e quattro con falda posta a 120 cm di profondità (WT120).

Uno dei lisimetri a falda libera, il lisimetro n° 10, ha evidenziato dei problemi di funzionamento durante la prova e i suoi risultati, giudicati non attendibili, non saranno di seguito illustrati.

Uno sguardo generale in merito alla differenza di umidità nei suoli nudi e quelli con *Raphanus* delinea che in quelli nudi il contenuto volumetrico di acqua è più alto rispetto a quelli coltivati a rafano lungo tutto il profilo. La variazione di umidità è di circa il 5% per gli strati superficiali e medi e del 2,5% per lo strato profondo.

Lo strato superficiale (0-20 cm) è quello che ha risentito maggiormente dei fenomeni di evapotraspirazione e irrigazione. Si può osservare, infatti, che l'umidità del suolo misurata ha avuto un andamento piuttosto variabile, con umidità minime intorno al 20% e con punte massime del 45% in tutti i livelli di falda.

Lo strato medio (20-45 cm) presenta un valore di umidità che oscilla attorno a valori del 30-40%, tranne nel lisimetro 2 (con falda a profondità di 60 cm) dove si può notare un picco di umidità del 50% che si mantiene costante per quasi tutto l'arco della prova. Per quanto riguarda gli altri lisimetri si osservano spesso condizioni di saturazione, sia in presenza di falda che in quelle a drenaggio libero (FD).

Lo strato più profondo è quello che risente in misura maggiore della presenza della falda; infatti le sonde sono posizionate in una zona quasi completamente satura d'acqua. Ciò è apparso evidente nei lisimetri WT60, in cui l'umidità è stata quasi sempre costante intorno al 45%. Al contrario, nei lisimetri FD l'umidità negli strati profondi

mantiene valori di umidità che oscillano tra il 30% e 40%. Per i WT120 si osservano valori di umidità più alti, compresi tra il 40 e 45% (Figure 3.3, 3.4 e 3.5).

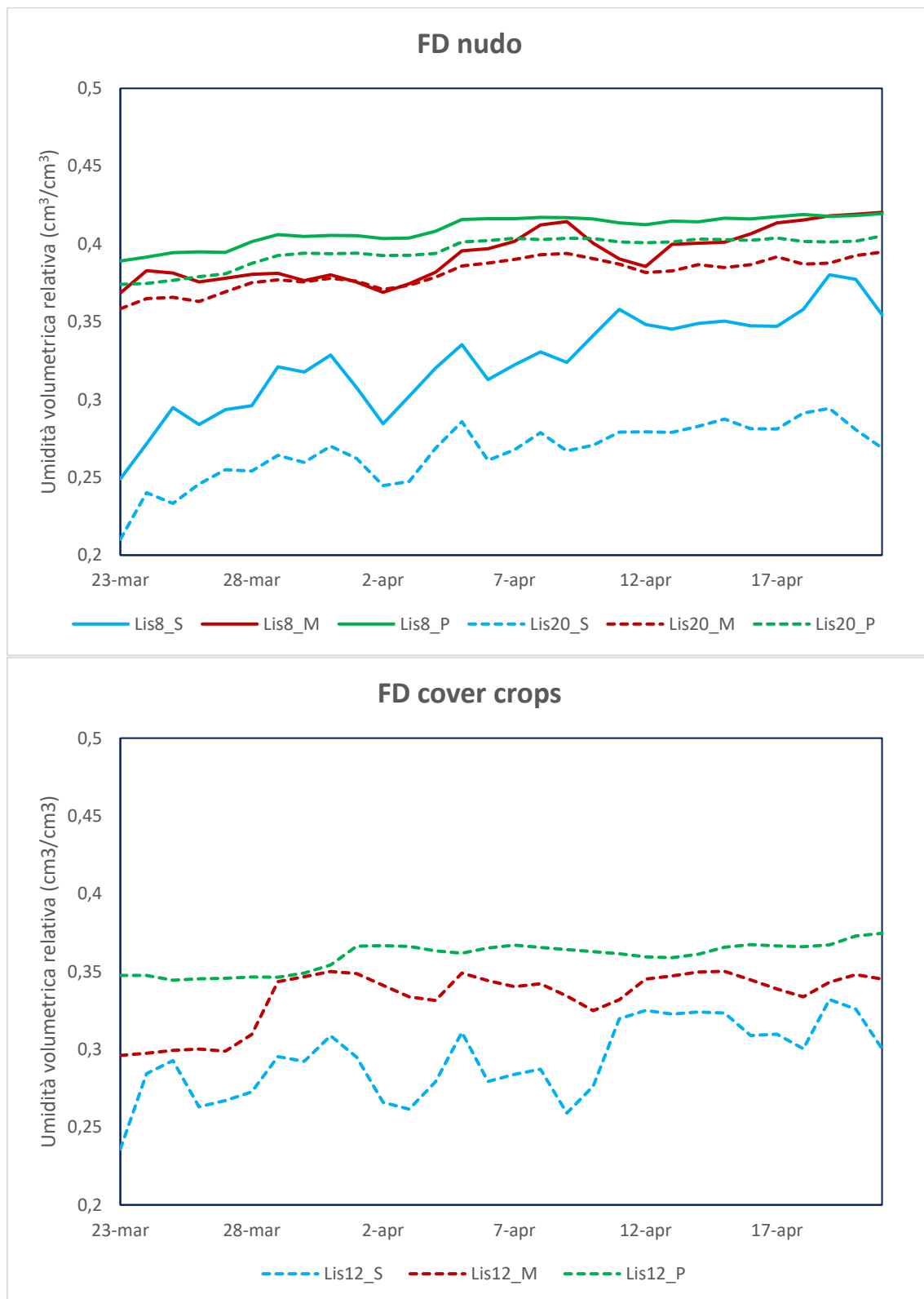


Figura 3.3 Contenuto idrico nei profili di suolo nei lisimetri a falda libera in assenza di coltura (FD nudo) e in presenza di rafano (FD cover crops) nel periodo 23 marzo - 21 aprile 2017.

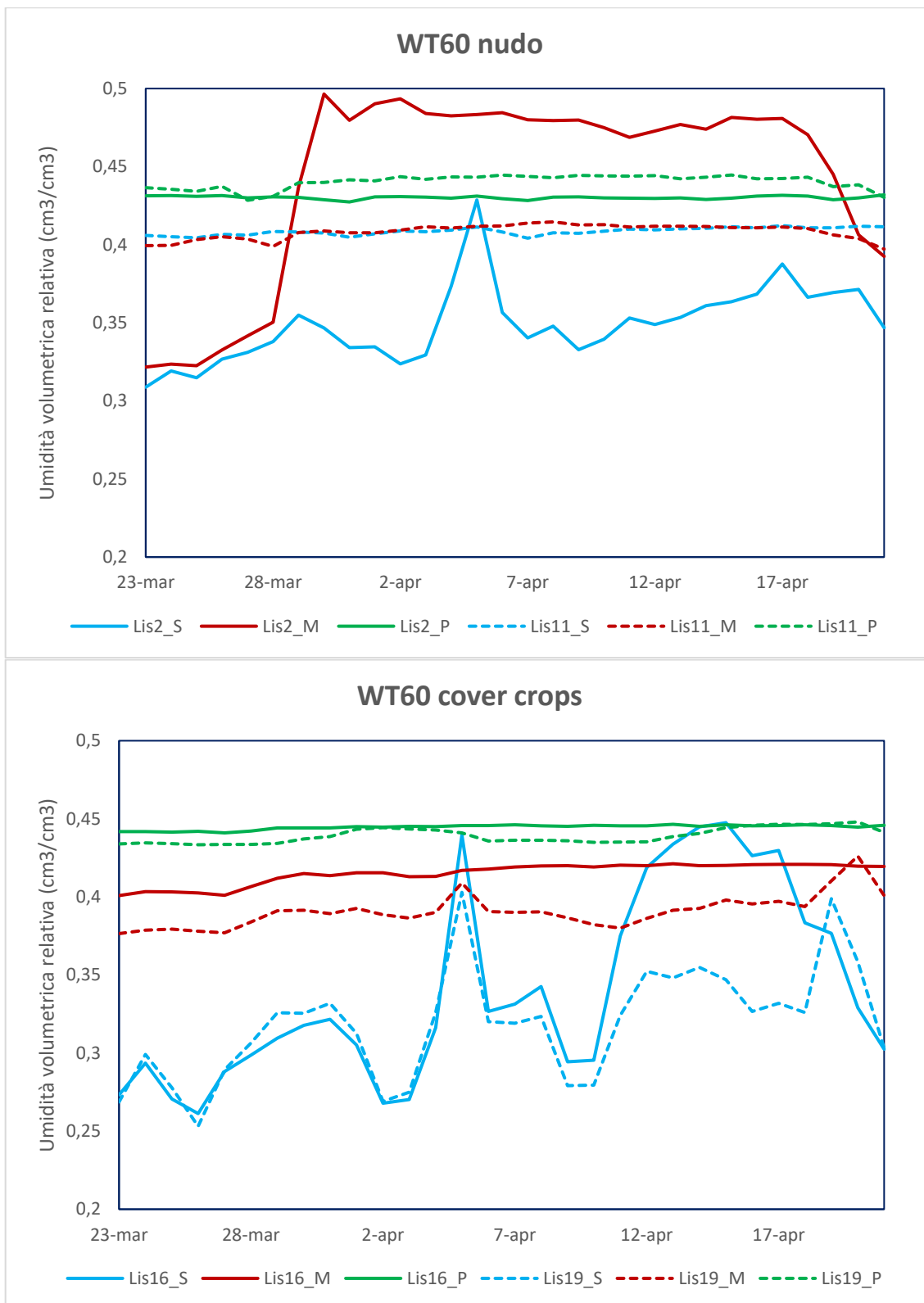


Figura 3.4 Contenuto idrico nei profili di suolo nei lisimetri con falda a 60 cm di profondità in assenza di coltura (WT60 nudo) e in presenza di rafano (WT60 cover crops) nel periodo 23 marzo - 21 aprile 2017.

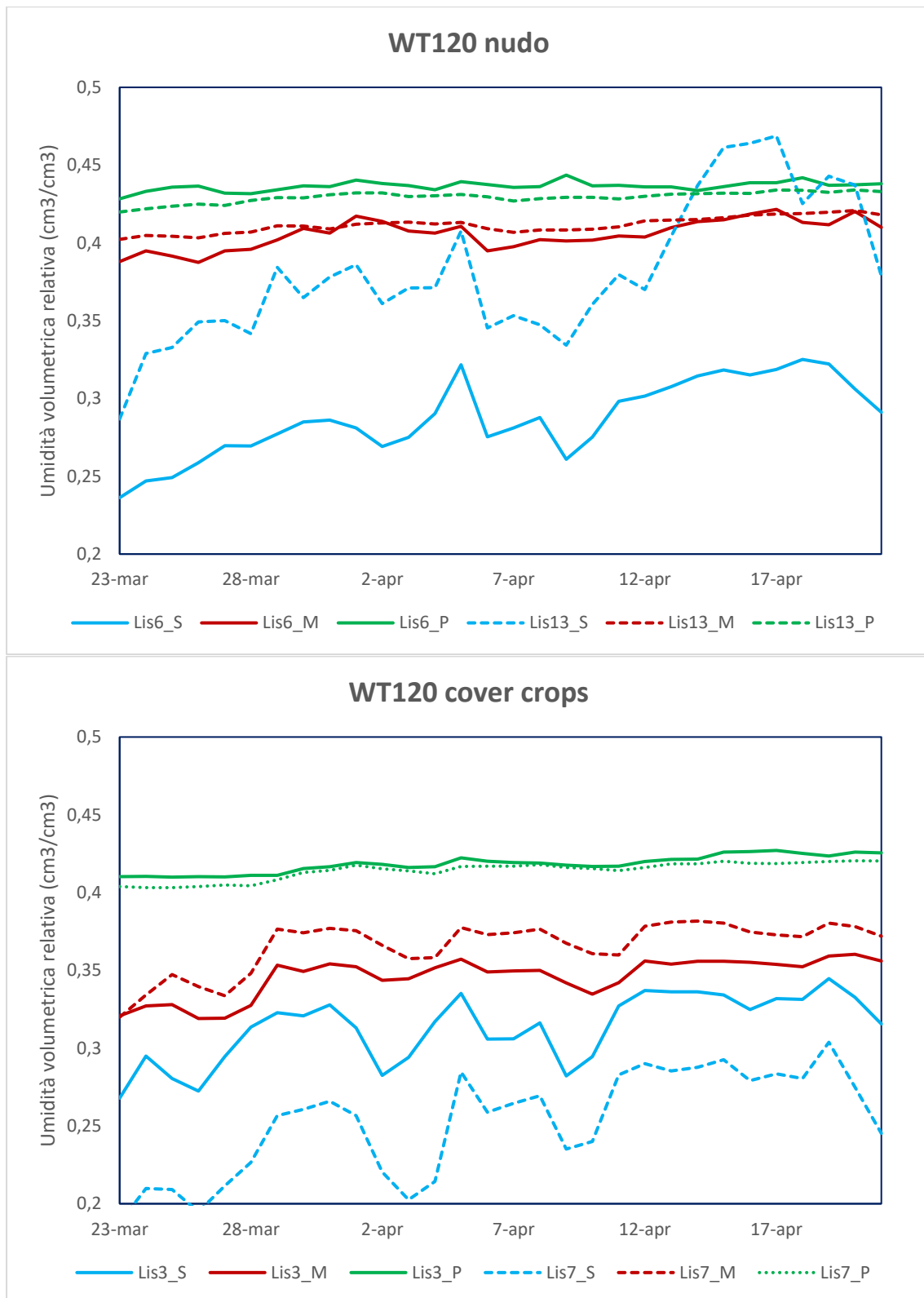


Figura 3.5 Contenuto idrico nei profili di suolo nei lisimetri con falda a 120 cm di profondità in assenza di coltura (WT120 nudo) e in presenza di rafano (WT120 cover crops) nel periodo 23 marzo - 21 aprile 2017.

3.1.3 Analisi chimiche dell'acqua (Br⁻)

A partire dal giorno seguente il momento di applicazione del tracciante KBr (1000 ppm accompagnato da una pioggia simulata di 10 mm), il 28 marzo 2017, nei lisimetri privi di *cover crop* è stato possibile rilevare a 15 cm di profondità una concentrazione media di Br⁻ pari a 63,47 mg/l, corrispondente anche al picco più alto registratosi a quella data profondità; nello stesso giorno, a 30 cm troviamo una concentrazione media di Br⁻ di 10,97 mg/l e a 60 cm una concentrazione media di 0,68 mg/l.

A 30 cm e 60 cm, il picco più alto risulta sfasato di qualche giorno, rispettivamente il 4 aprile a 30 cm (29,14 mg/l) e 12 aprile a 60 cm (14,04 mg/l). A livello grafico si può notare un aumento della concentrazione di bromo in corrispondenza dell'evento piovoso del 4 aprile 2017 (Figura 3.6). Questa dinamica conferma l'esistenza di fenomeni di lisciviazione verso la falda a seguito dell'immissione del tracciante.

Per quanto riguarda la presenza di *Raphanus sativus* l'andamento è evidentemente diverso (Figura 3.7). A 15 cm di profondità, mediamente, il picco massimo di bromo si osserva il secondo giorno dall'iniezione, 29,50 mg/L, mentre a 30 cm risulta ritardato il 3 aprile 2017 (4,16 mg/L). Nello strato più profondo (60 cm) le concentrazioni sono sempre molto basse (valore massimo 1,17 mg/L) in tutto il periodo di monitoraggio, a conferma del fatto che le piante di rafano assorbono l'elemento, rallentandone il movimento lungo il profilo di suolo. Tutto ciò sembra confermare quanto riportato da altri studi in cui si è utilizzato il bromo come tracciante, che affermano che quantità di Br⁻ fino al 53% possono essere assorbite dalle piante (Kung, 1989).

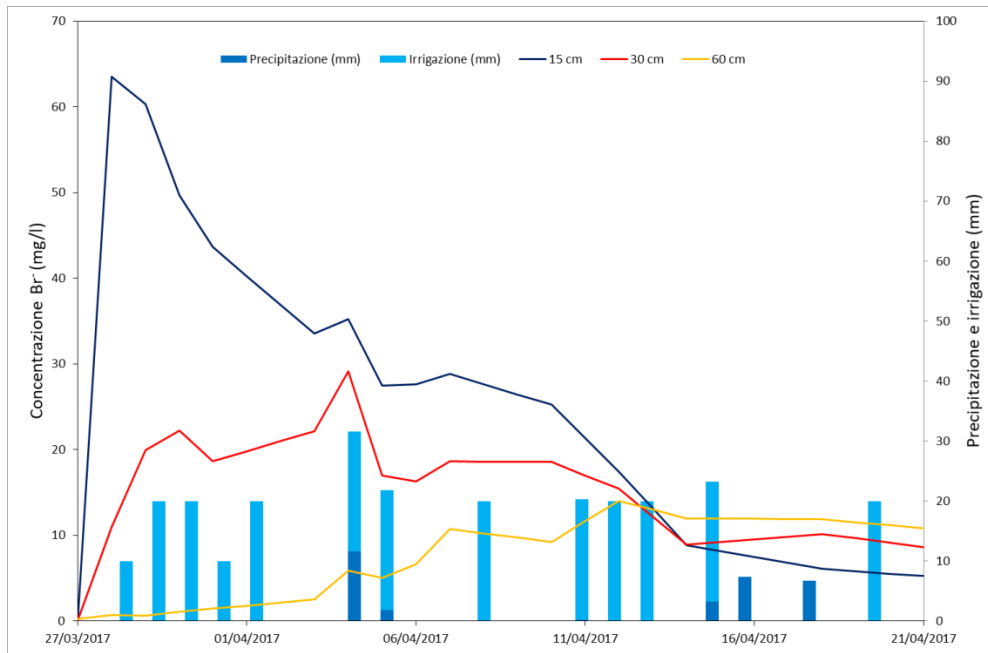


Figura 3.6 Andamento delle concentrazioni medie alle 3 diverse profondità (15 cm, 30 cm e 60 cm) in suolo nudo

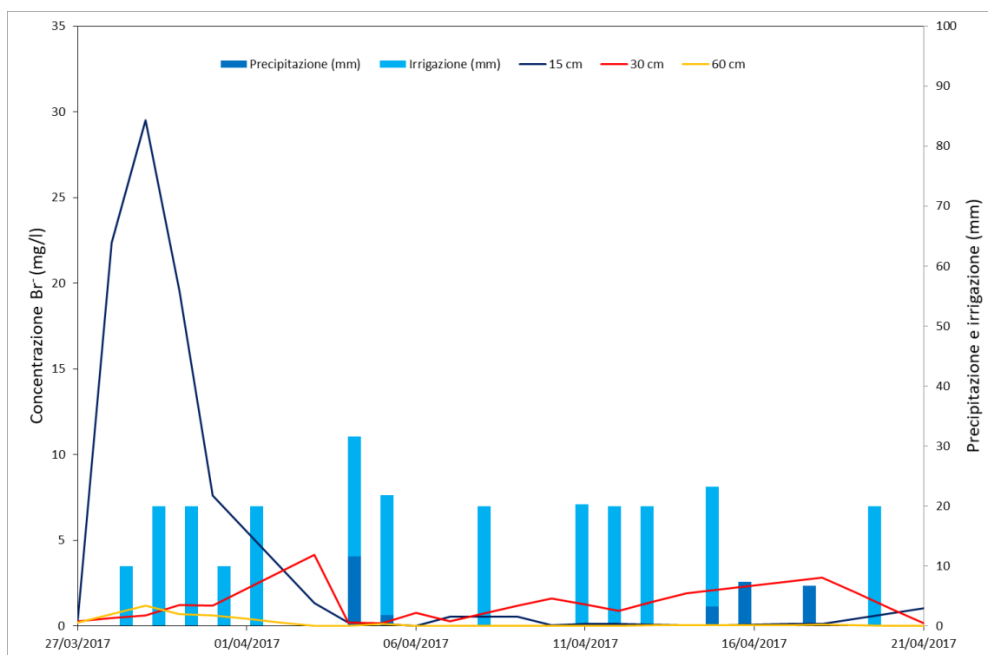


Figura 3.7 Andamento delle concentrazioni medie alle 3 diverse profondità (15 cm, 30 cm e 60 cm) in suolo con *Raphanus sativus*

3.2 Modellistica

3.2.1 Hydrus-1D – inversione del modello

Il metodo dell'inversione di Hydrus ha permesso di caratterizzare idraulicamente il suolo dei lisimetri e le sue proprietà di trasporto dei soluti. Già in fase di inversione è stato possibile riconoscere dai dati una buona corrispondenza tra i valori osservati e fittati di umidità volumetrica relativa (Figure 3.8, 3.9 e 3.10). Mediamente il valore di R^2 è stato di 0.8717, con un massimo di 0.9777 e un minimo di 0.6998.

A titolo di esempio, in Figura 3.11 sono presentate le variazioni dei dati di umidità volumetrica relativa simulati (linee continue) in relazione ai rispettivi dati sperimentali osservati (indicatore) per i lisimetri 2 (WT60 nudo) e 12 (FD rafano).

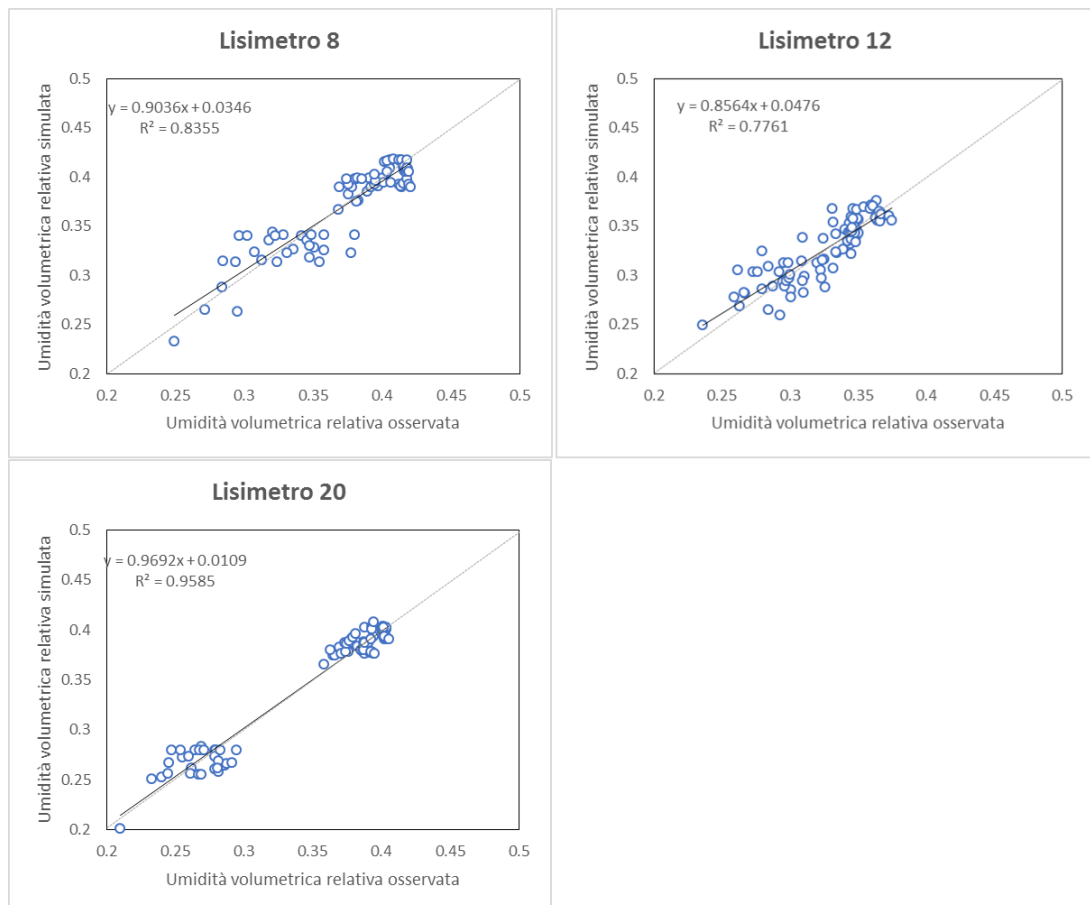


Figura 3.8 Relazione tra dati osservati e simulati dal modello Hydrus-1D di umidità volumetrica relativa dei lisimetri a falda libera.

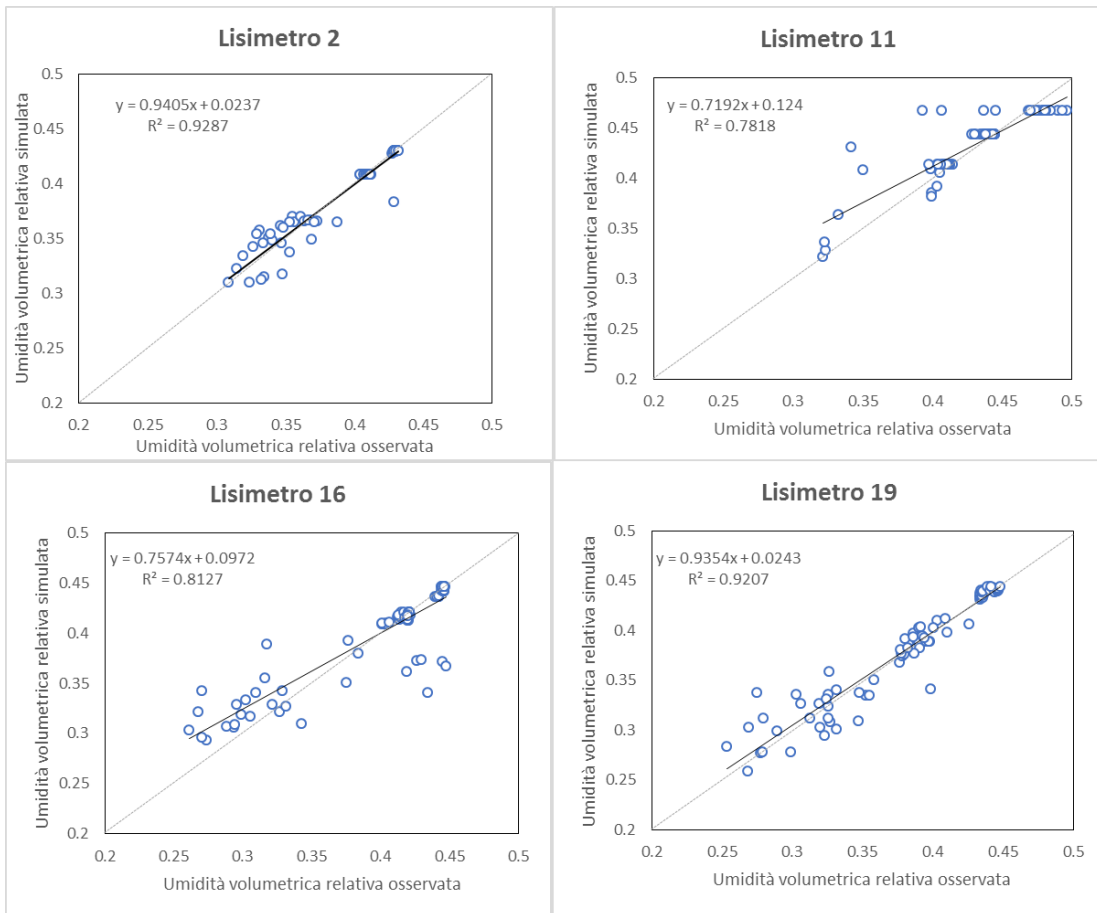


Figura 3.9 Relazione tra dati osservati e simulati dal modello Hydrus-1D di umidità volumetrica relativa dei lisimetri con falda a 60 cm di profondità.

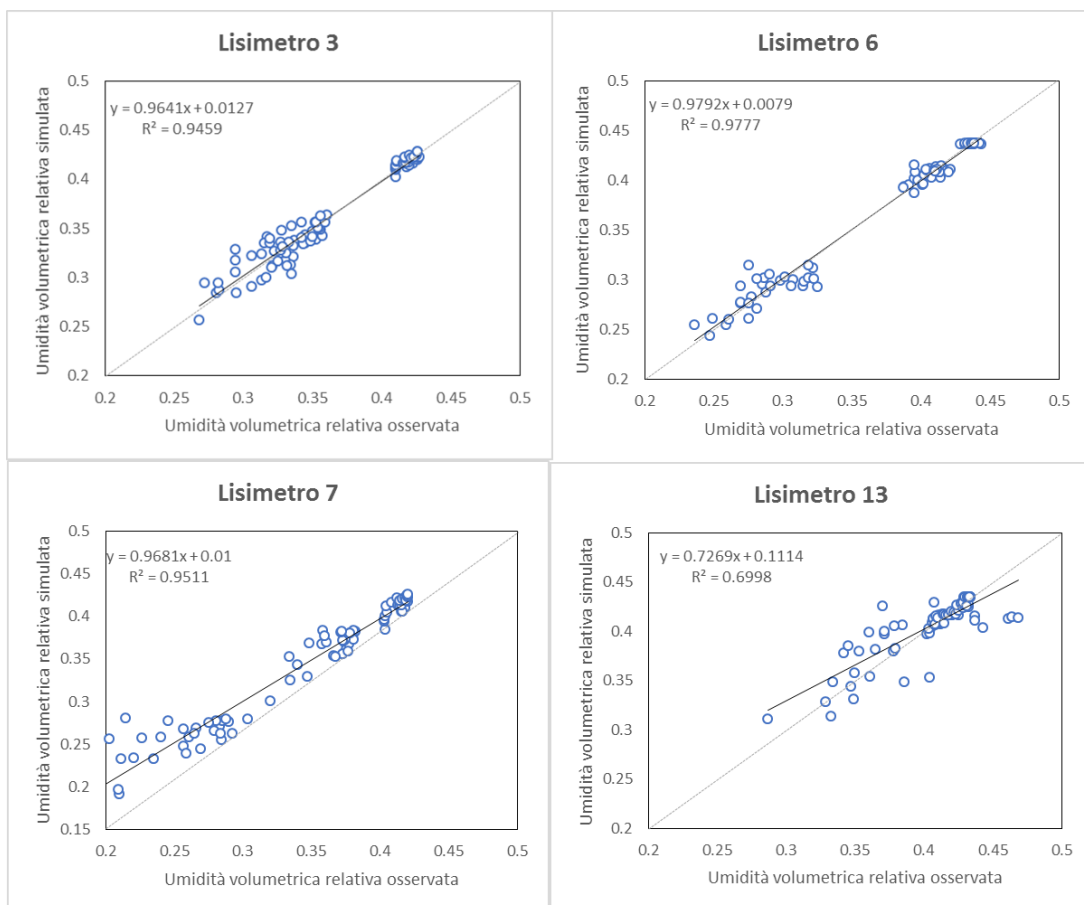


Figura 3.10 Relazione tra dati osservati e simulati dal modello Hydrus-1D di umidità volumetrica relativa dei lisimetri con falda a 120 cm di profondità.

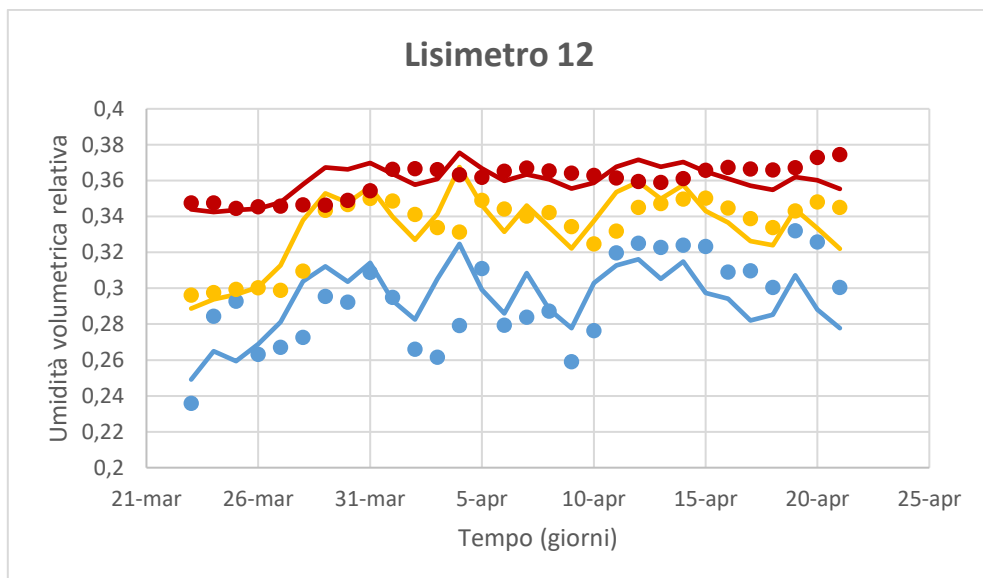
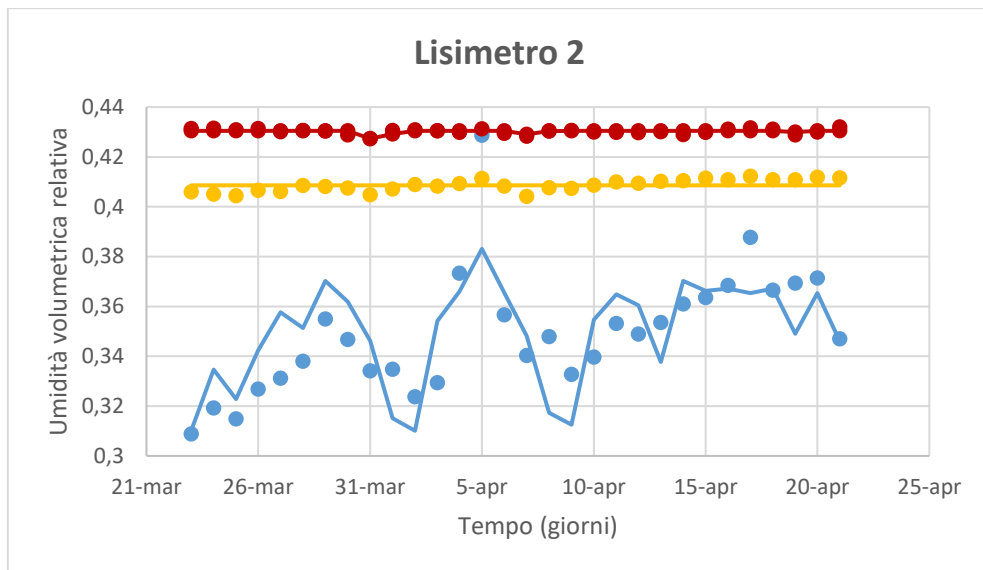


Figura 3.11 Esempio di corrispondenza tra valori di umidità del suolo reali (indicatore) e simulati con Hydrus-1D (linee continue) durante il procedimento di inversione. In azzurro è indicato lo strato più superficiale (15 cm di profondità), in giallo quello intermedio (30 cm di profondità) e in rosso quello profondo (60 cm di profondità). Il primo grafico (Lisimetro 2) è WT60 a suolo nudo mentre il secondo grafico (Lisimetro 12) è FD coltivato a *Raphanus sativus*.

3.2.2 Caratterizzazione del suolo – la curva di ritenzione idrica

La porosità a saturazione (θ_s) modellata con Hydrus-1D è risultata mediamente inferiore nei lisimetri con *Raphanus sativus* rispetto a quelli con il suolo nudo su tutto il profilo di suolo (Tabella 3.2).

θ_s medio (cm^3/cm^3)			
	S	M	P
Nudo	0,377	0,411	0,432
Rafano	0,374	0,400	0,428

Tabella 3.1 Valori di porosità a saturazione (θ_s) negli strati superficiali (S), medi (M) e profondi (P) per i lisimetri con rafano e suolo nudo.

La conducibilità idraulica (K_s), invece, ha mostrato una maggiore variabilità soprattutto nello strato superficiale e medio (Tabella 3.3), con valori mediamente più bassi in presenza di rafano rispetto al suolo nudo. I valori medi di α , parametro della curva di ritenzione del suolo, sono più elevati di qualche ordine di grandezza nei lisimetri con suolo nudo.

In riferimento alle diverse falde, si osservano mediamente valori più alti di θ_s dove la falda è più alta, ossia WT60, con $0,43 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; a seguire $0,40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ per WT120 e $0,38 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ per FD. Per K_s l'andamento è opposto. Si hanno valori medi nettamente più alti per FD rispetto a WT60 e WT120.

K_s medio (cm/d)			
	S	M	P
Nudo	458,13	1265,70	198,26
Rafano	391,97	184,81	88,57

Tabella 3.3 Valori di conducibilità idraulica media (K_s) negli strati superficiali (S), medi (M) e profondi (P) per i lisimetri con rafano e suolo nudo.

In Tabella 3.4 e 3.5 sono schematizzati i parametri della curva di Van Genuchten ottenuti da Hydrus-1D, rispettivamente per il suolo nudo e suolo coltivato a *Raphanus*.

In Figura 3.12, 3.13 e 3.14 sono raffigurate le curve di ritenzione idrica sulla base del modello di Van Genuchten alle diverse profondità di falda (FD, WT60 e WT120) nei tre profili di suolo (0-20 cm; 20-45 cm; 45-130 cm), mettendo in relazione il logaritmo del potenziale matriciale e l'umidità volumetrica relativa (cm^3/cm^3).

				Profilo					
Lisimetro	Altezza falda (cm)	Cover crop	Profondità	θ_r (cm^3/cm^3)	θ_s (cm^3/cm^3)	α (cm^{-1})	n	Ks (cm/d)	l
2	WT60	no	S	0,06743	0,38309	0,22914	1,12910	221,36000	0,50000
2	WT60	no	M	0,00010	0,40859	0,00766	1,11000	499,18000	0,50000
2	WT60	no	P	0,02030	0,43046	0,00381	1,11000	885,71000	0,50000
6	WT120	no	S	0,00021	0,33986	0,01597	1,37200	443,30000	0,50000
6	WT120	no	M	0,00140	0,41828	0,00594	1,20740	111,19000	0,50000
6	WT120	no	P	0,00000	0,43670	0,00015	1,11980	11,00400	0,50000
8	FD	no	S	0,00200	0,35000	0,00555	1,69000	15,00000	0,50000
8	FD	no	M	0,00052	0,40171	0,00394	1,16450	152,00000	0,03367
8	FD	no	P	0,00429	0,42000	0,01400	1,07000	100,00000	0,50000
11	WT60	no	S	0,00011	0,46721	0,04020	1,87700	6,63600	0,50000
11	WT60	no	M	0,05736	0,41368	0,02920	1,63640	61,49000	0,50000
11	WT60	no	P	0,01898	0,44373	0,07681	1,88200	2,81640	0,50000
13	WT120	no	S	0,07788	0,42880	0,01032	1,92130	2048,10000	0,50000
13	WT120	no	M	0,00000	0,41721	0,00327	1,96970	1063,60000	0,50000
13	WT120	no	P	0,00001	0,43461	0,00615	1,14160	39,14900	0,50000
20	FD	no	S	0,00005	0,29351	0,00447	1,52000	14,40000	0,50000
20	FD	no	M	0,02000	0,41000	0,04895	1,04900	5742,40000	0,50000
20	FD	no	P	0,00020	0,43053	0,01110	1,17000	150,00000	0,50000

Tabella 3.4 Parametri della curva di ritenzione idrica secondo il modello di Van Genuchten calcolati con il metodo dell'inversione per i profili superficiali (S), medi (M) e profondi (P) per i lisimetri in assenza di copertura (suolo nudo).

				Profilo					
Lisimetro	Altezza falda (cm)	Cover crop	Profondità	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (cm ⁻¹)	n	Ks (cm/d)	I
3	WT120	si	S	0,00089	0,36000	0,00686	1,56290	5,81980	0,50000
3	WT120	si	M	0,02176	0,36673	0,00424	1,59950	79,84800	0,50000
3	WT120	si	P	0,00247	0,42549	0,00286	1,78160	4,93960	0,50000
7	WT120	si	S	0,00100	0,35000	0,00802	2,79860	7,35370	0,50000
7	WT120	si	M	0,00010	0,40000	0,00527	2,81780	446,15000	0,50000
7	WT120	si	P	0,00001	0,43000	0,00488	2,55100	5,10290	0,50000
12	FD	si	S	0,02988	0,35000	0,01143	1,50190	8,22920	0,10000
12	FD	si	M	0,05970	0,39780	0,01440	1,46380	124,18000	0,02820
12	FD	si	P	0,07000	0,38290	0,01991	1,48820	18,65500	0,50000
16	WT60	si	S	0,00001	0,43593	0,07018	1,22000	400,00000	0,50000
16	WT60	si	M	0,00022	0,42100	0,00401	1,20000	228,00000	0,50000
16	WT60	si	P	0,01140	0,44600	0,00615	1,20000	201,00000	0,50000
19	WT60	si	S	0,00660	0,40683	0,02661	1,39400	46,65700	0,50000
19	WT60	si	M	0,05000	0,40962	0,01058	1,41710	106,03000	0,50000
19	WT60	si	P	0,02223	0,44367	0,00650	1,15240	22,47000	0,50000

Tabella 3.5 Parametri della curva di ritenzione idrica secondo il modello di Van Genuchten calcolati con il metodo dell'inversione per i profili superficiali (S), medi (M) e profondi (P) per i lisimetri in presenza di cover crop (*Raphanus sativus*).

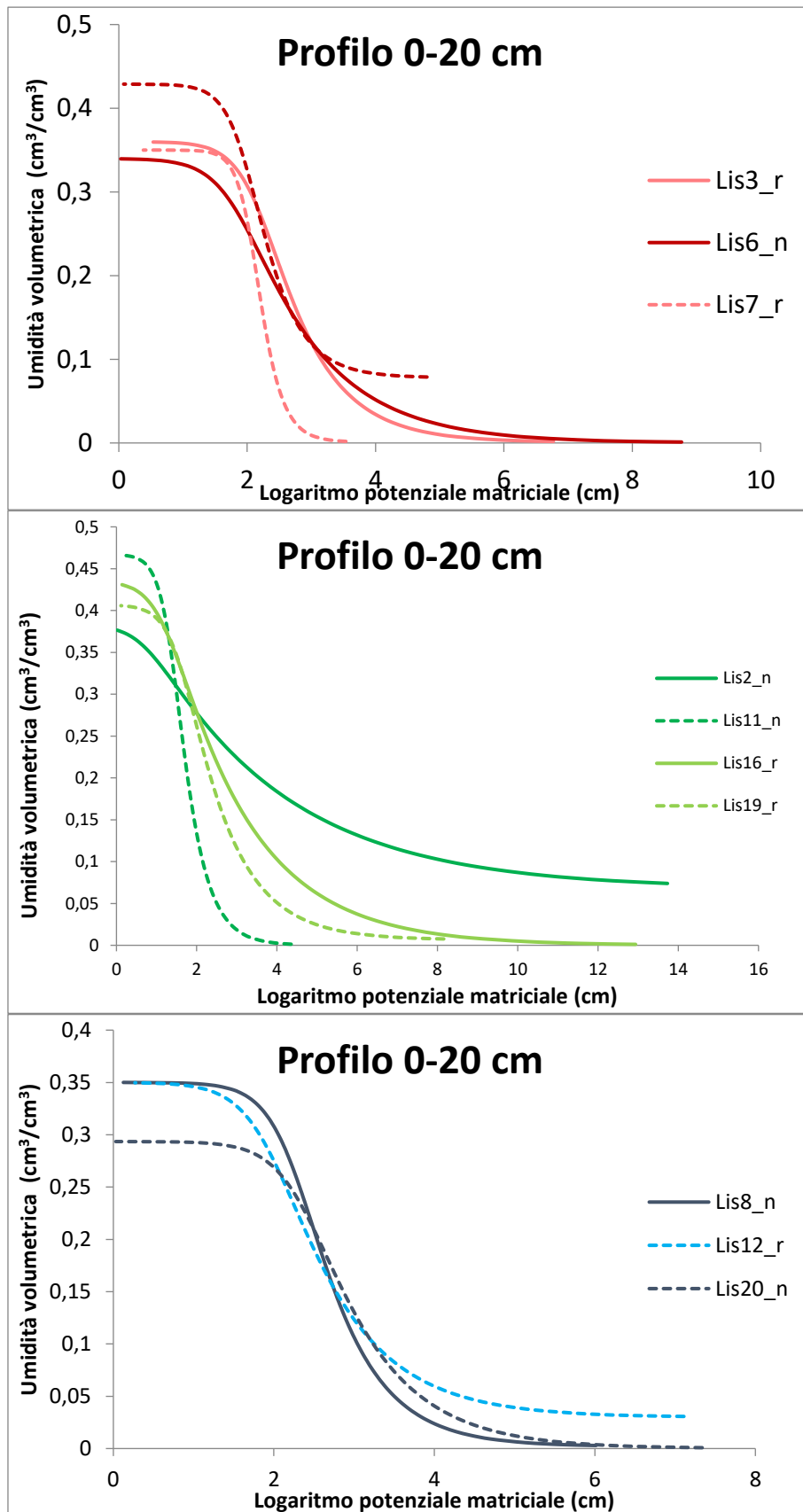


Figura 3.12: Curve di ritenzione idrica per lo strato 0-20 cm a tre diversi livelli di falda: WT60 (linee verdi), WT120 (linee rosse) e FD (linee blu). Suffissi: n = suolo nudo; r = rafano.

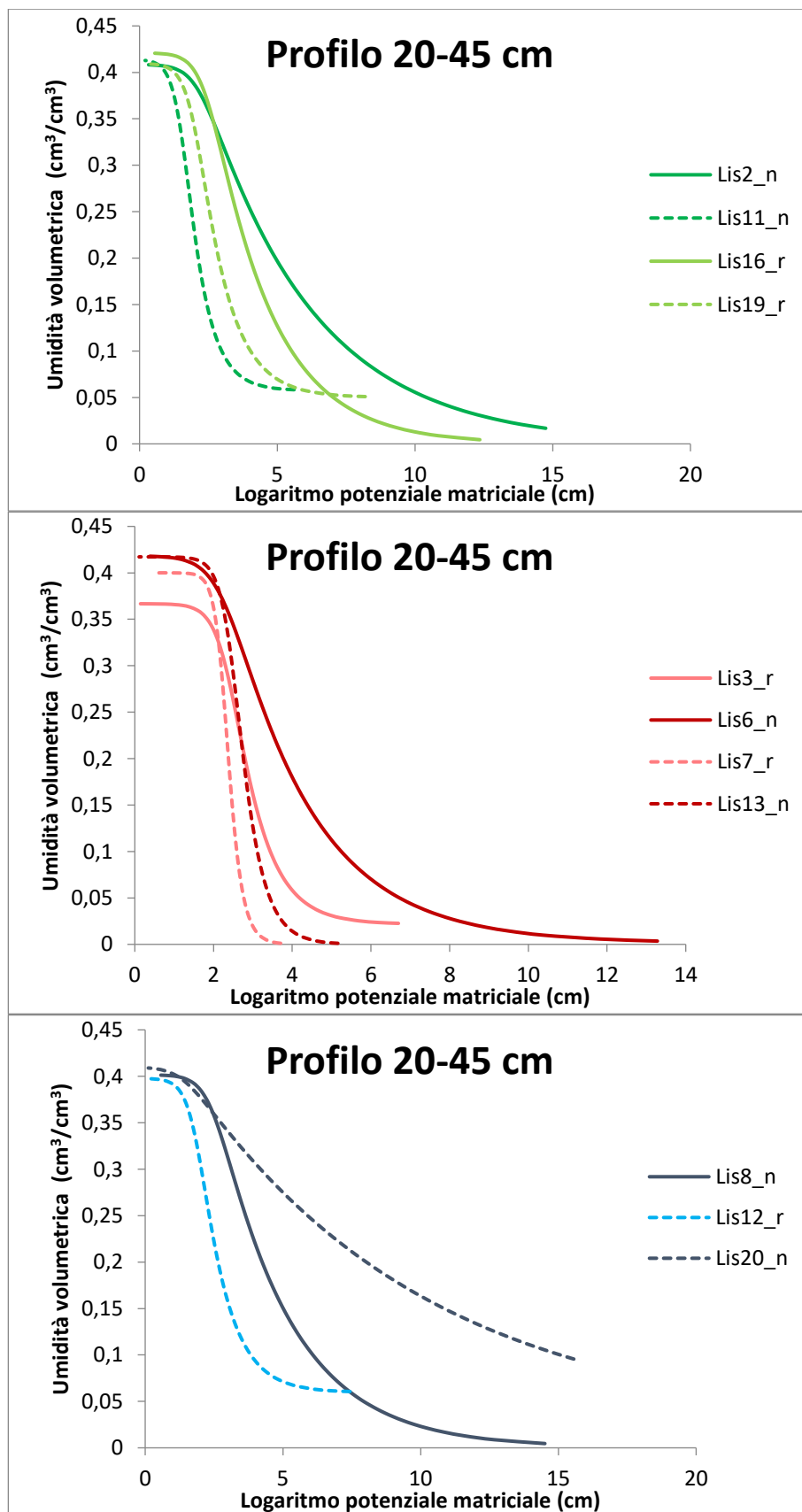


Figura 3.13 Curve di ritenzione idrica per lo strato 20-45 cm a tre diversi livelli di falda: WT60 (linee verdi), WT120 (linee rosse) e FD (linee blu). Suffissi: n = suolo nudo; r = rafano.

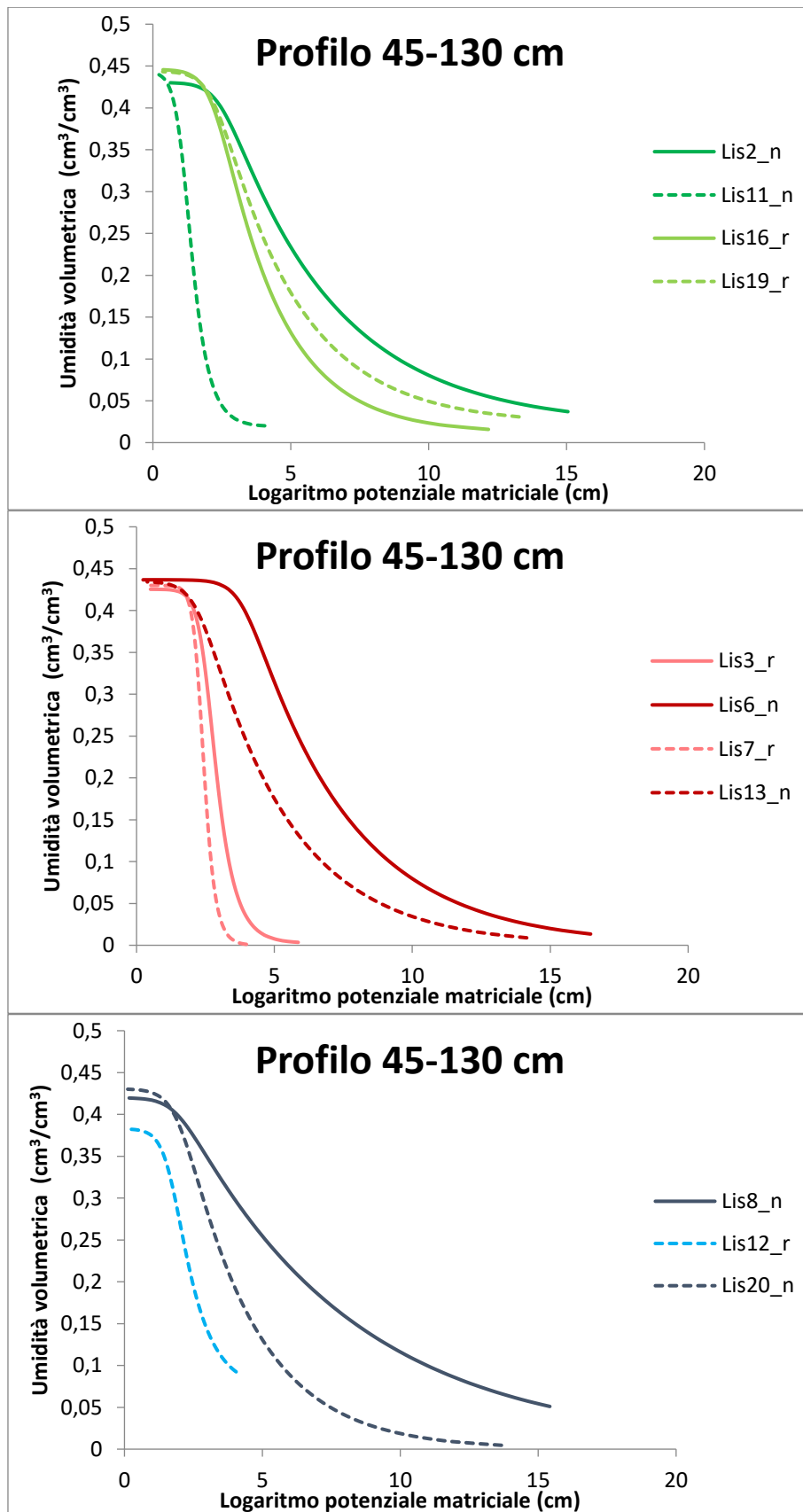


Figura 3.14 Curve di ritenzione idrica per lo strato 45-130 cm a tre diversi livelli di falda: WT60 (linee verdi), WT120 (linee rosse) e FD (linee blu). Suffissi: n = suolo nudo; r = rafano.

3.2.3 Caratterizzazione del suolo e movimento dei soluti lungo il profilo

L'applicazione del modello inverso al movimento del bromuro nel profilo lisimetrico ha restituito dei valori simulati che riscontrano una sufficiente corrispondenza con quelli osservati. In Figura 3.15 e 3.16 vengono riportate rispettivamente le linee di tendenza dei dati osservati e fittati dal modello della concentrazione di bromuro per le varie profondità di falda e in base alla presenza o meno di copertura vegetativa. Mediamente il valore di R^2 è stato di 0.68857, con un massimo di 0.8737 e un minimo di 0.5011.

In Figura 3.17, 3.18 e 3.19 vengono riportati alcuni esempi di corrispondenza tra valori di concentrazione di Br^- espressa in mg/cm^3 dei dati simulati (linee continue) con quelli sperimentali (indicatore puntuale).

I valori di dispersività longitudinale medio ($D_{z \text{ medio}}$) (cm) stimati con Hydrus per i lisimetri in assenza o presenza di *cover crop* sono riportati in Tabella 3.6.

In generale si può notare come la dispersività longitudinale sia più alta nello strato superficiale in presenza di rafano rispetto al suolo nudo, mentre negli altri due profili l'andamento sembra essere opposto.

	$D_{z \text{ medio}}$ (cm)	
	<i>Raphanus sativus</i>	suolo nudo
S	141,4	48,8
M	32	184,2
P	2,8	80,3

Tabella 3.6 Valori medi di dispersività longitudinale (D_z) (cm) lungo gli strati superficiali (S), medi (M) e profondi (P) in presenza di rafano e suolo nudo.

La costante di ripartizione (K_d), pur avendo valori piuttosto variabili, presenta valori sempre molto bassi, confermando l'affinità dello ione bromuro per la fase acquosa rispetto al suolo. Infatti K_d , rappresentando il rapporto tra concentrazione di bromuro in acqua e nel suolo e risultando mediamente 0,0055 denota l'assenza di fenomeni di adsorbimento di Br^- al suolo il quale, al contrario, ha seguito il movimento dell'acqua nel terreno e nella pianta di rafano.

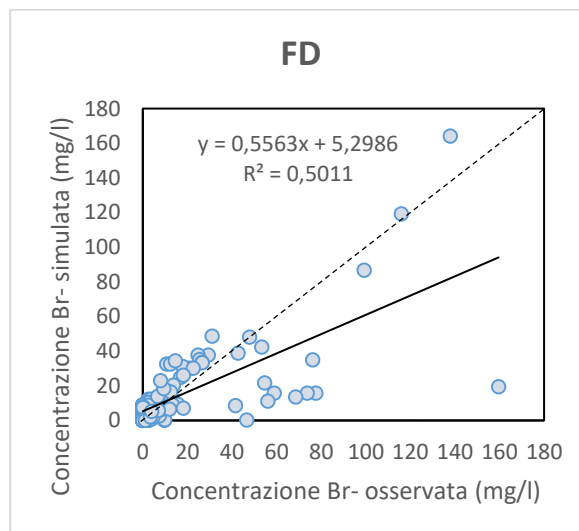
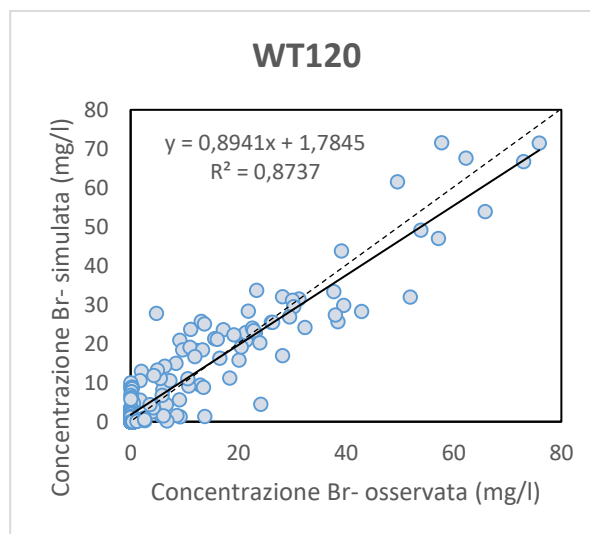
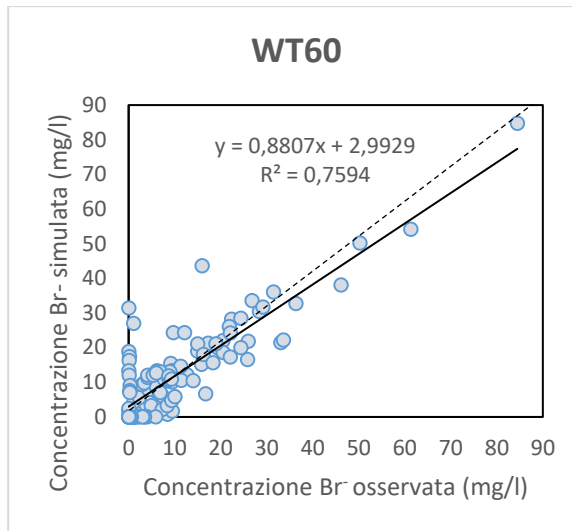


Figura 3.15 Relazione tra dati osservati e fittati dal modello Hydrus-1D delle concentrazioni di Br^- rilevati lungo il profilo per la falda a 60 cm (WT60), falda a 120 cm (WT120) e drenaggio libero (FD).

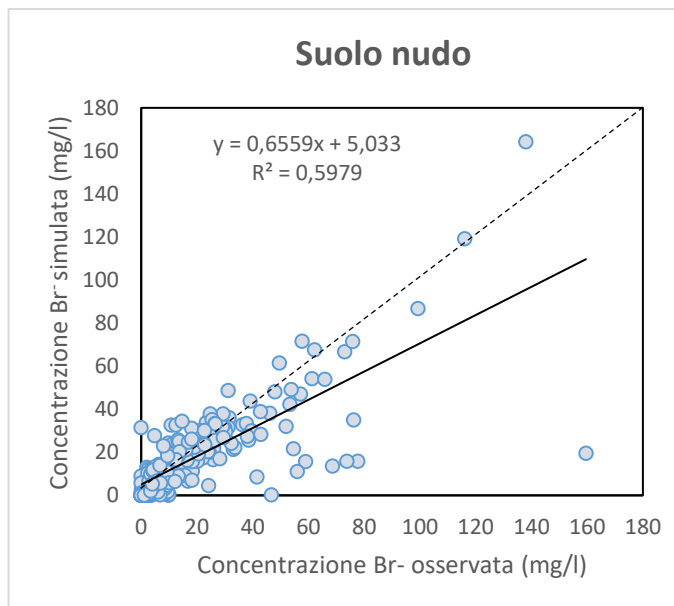
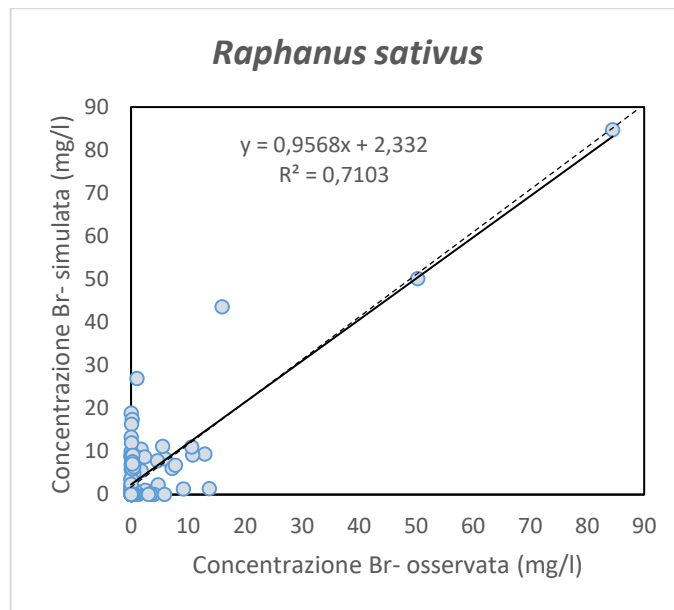


Figura 3.16: Relazione tra dati osservati e fittati dal modello Hydrus-1D delle concentrazioni di Br^- rilevati lungo il profilo in presenza di *Raphanus sativus* e in assenza di *cover crops* (suolo nudo).

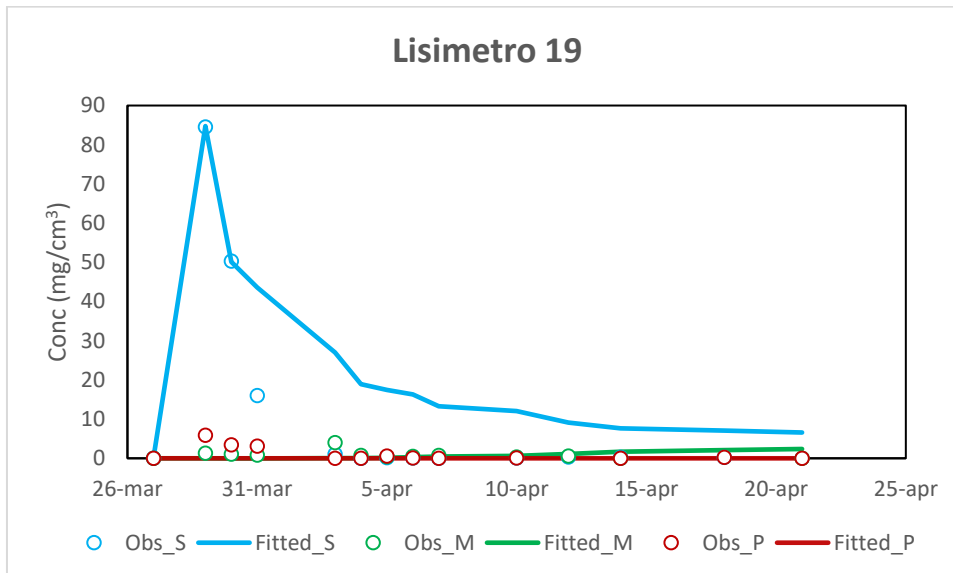
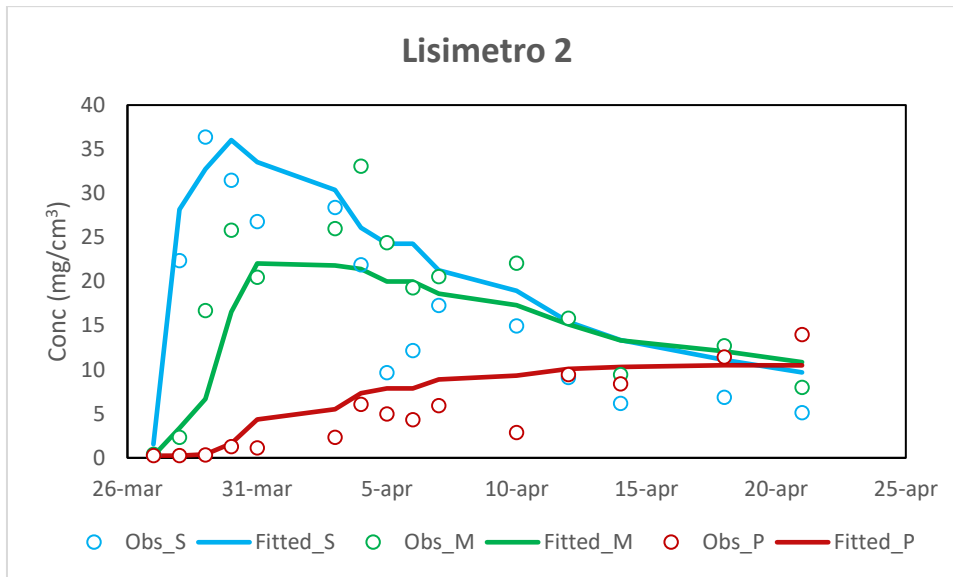


Figura 3.17 Corrispondenza tra valori di concentrazione di Br⁻ osservati (*Obs*) e fittati dal modello (*Fitted*) per falda a 60 cm in presenza di suolo nudo (lisimetro 2) e suolo con rafano (lisimetro 19).

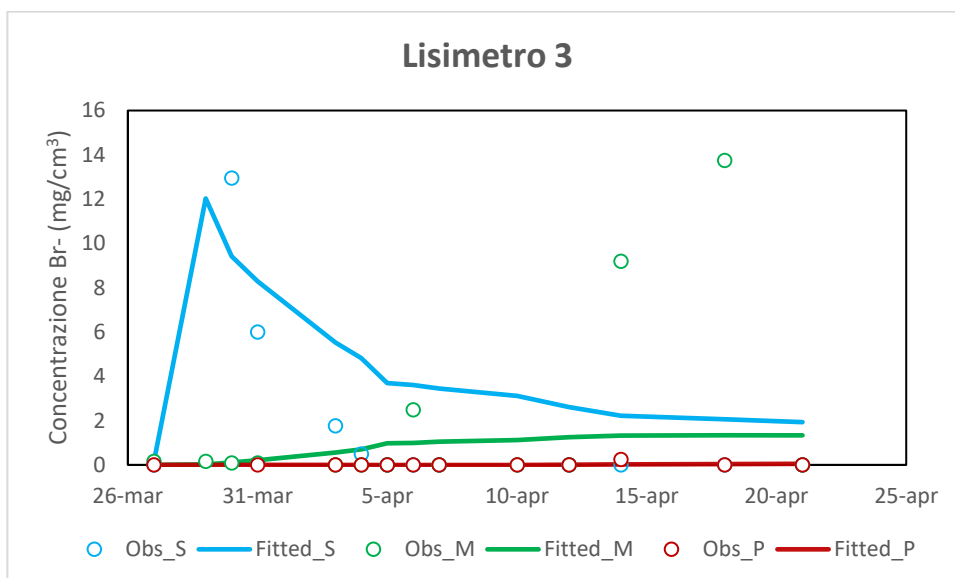
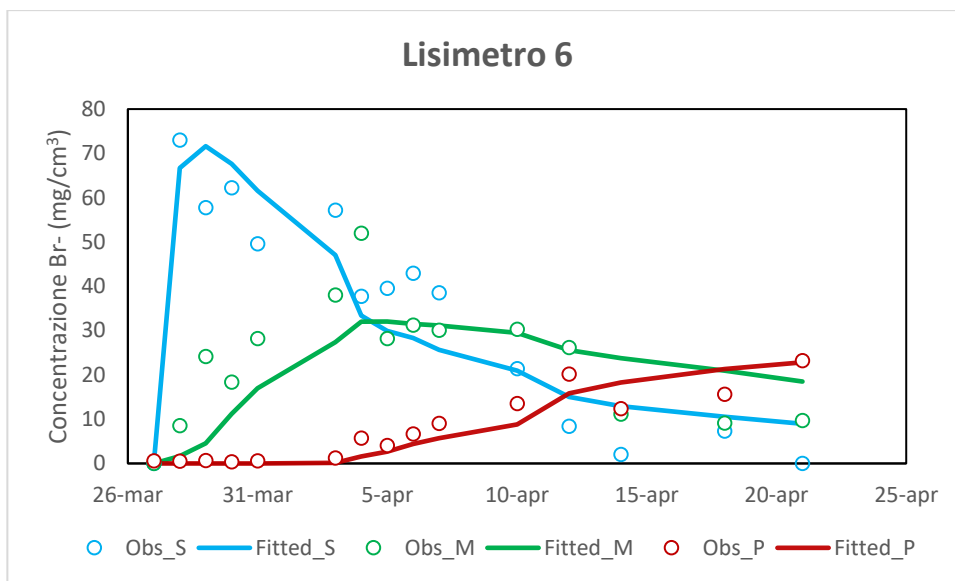


Figura 3.18 Corrispondenza tra valori di concentrazione di Br⁻ osservati (*Obs*) e fittati dal modello (*Fitted*) per falda a 120 cm in presenza di suolo nudo (lisimetro 6) e suolo con rafano (lisimetro 3).

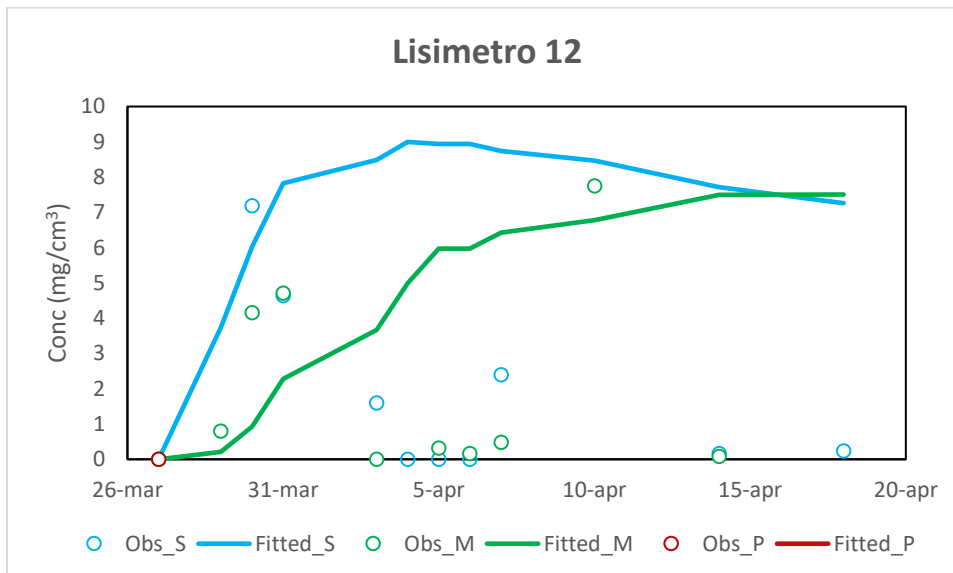
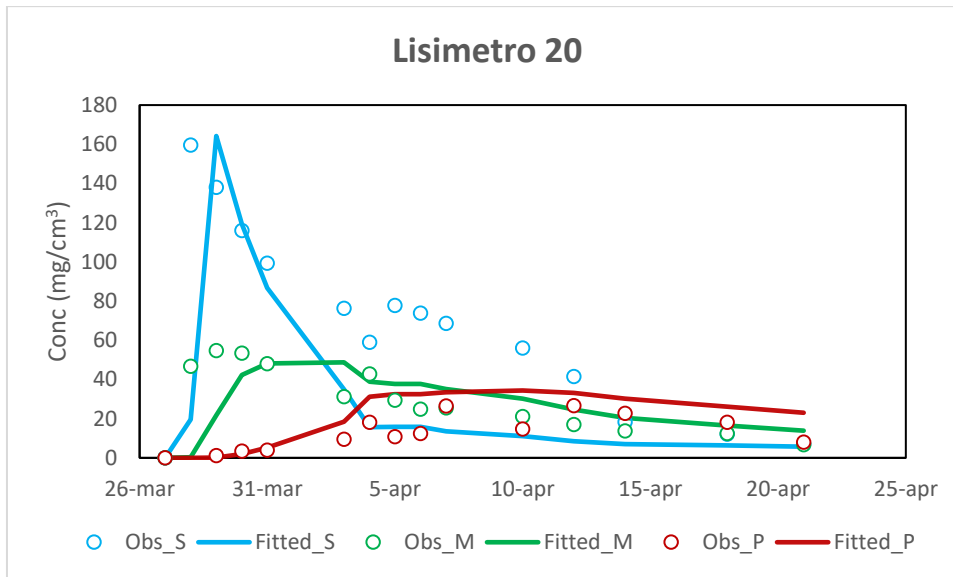


Figura 3.19 Corrispondenza tra valori di concentrazione di Br⁻ osservati (*Obs*) e fittati dal modello (*Fitted*) per falda a falda libera in presenza di suolo nudo (lisimetro 20) e suolo con rafano (lisimetro 12).

Lisimetro	Altezza falda (cm)	Cover crop	Profondità	profilo	
				(Dz) (cm)	Kd
2	WT60	no	S	20	0,0005
2	WT60	no	M	20	0,000005
2	WT60	no	P	300	0,00025
6	WT120	no	S	10	0,0002
6	WT120	no	M	10	0,0003
6	WT120	no	P	3,1192	0,0633
8	FD	no	S	20	0,0022
8	FD	no	M	40	0,0001
8	FD	no	P	60	0,00001
11	WT60	no	S	200	0,0002
11	WT60	no	M	15	0,0015
11	WT60	no	P	112,72	0,00000001
13	WT120	no	S	40	0,00006
13	WT120	no	M	20	0,00045
13	WT120	no	P	1	0,01
20	FD	no	S	2,6	0,000002
20	FD	no	M	1000	0,000001
20	FD	no	P	5	0,01

Tabella 3.7 Dispersività longitudinale (*Dz*) espressa in cm e costante di ripartizione (*Kd*) stimate con il metodo dell'inversione nei lisimetri privi di *cover crop* nei diversi profili superficiale, medio e profondo.

Lisimetro	Altezza falda (cm)	Cover crop	Profondità	profilo	
				(Dz) (cm)	Kd
3	WT120	si	S	65	0,001
3	WT120	si	M	90	0,02
3	WT120	si	P	10	0,01
7	WT120	si	S	100	0,0022
7	WT120	si	M	5	0,01
7	WT120	si	P	1	0,01
12	FD	si	S	32	0,003
12	FD	si	M	50	0,0005
12	FD	si	P	1	0,001
16	WT60	si	S	500	0,03
16	WT60	si	M	10	0,01
16	WT60	si	P	1	0,0001
19	WT60	si	S	10	0,00004
19	WT60	si	M	5	0,006
19	WT60	si	P	1	0,001

Tabella 3.8 Dispersività longitudinale (*Dz*) espressa in cm e costante di ripartizione (*Kd*) stimate con il metodo dell'inversione nei lisimetri in presenza di rafano nei diversi profili superficiale, medio e profondo.

4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

In tutto il periodo è stata monitorata l'umidità volumetrica per ogni lisimetro e, come è emerso graficamente, si notano lievi differenze tra i lisimetri a drenaggio libero, quelli con falda a 60 cm e quelli con falda 120 cm. Se l'andamento risulta pressoché identico in quasi tutti i lisimetri, con uno strato medio e profondo prossimo alla saturazione e uno strato superficiale con un andamento più variabile, i valori di umidità sono mediamente inferiori nei lisimetri a falda libera rispetto a quelli con falda. Per quanto riguarda un confronto tra lisimetri con copertura vegetale e quelli a suolo nudo, anche in questo caso si nota un andamento simile con valori mediamente più bassi nei lisimetri con *cover crops*. Tale differenza è da imputare all'assorbimento idrico da parte delle radici del rafano.

Per quanto riguarda il monitoraggio con il tracciante al bromo (KBr), si sono notati due diversi andamenti a seconda della presenza di suolo nudo o *Raphanus sativus*. Nel primo caso si può notare che nello strato superficiale si ha una concentrazione molto alta di bromo immediatamente dopo l'applicazione del tracciante; nello strato medio il picco massimo è sfasato di qualche giorno per permettere l'arrivo del bromo a tale profondità e infine nello strato più profondo troviamo la concentrazione massima ancora più sfasata e concentrazioni di bromo più basse rispetto agli strati più superficiali. Tuttavia si riscontra sempre una certa quantità di bromo in tutto il periodo di prova e in tutte e tre le profondità.

In presenza di *Raphanus sativus*, invece, si ha una quantità molto alta di bromo nello strato superficiale subito dopo applicazione del tracciante, poi per i giorni seguenti le concentrazioni di bromo risultano quasi inesistenti in tutti e tre gli strati poiché le radici della pianta tendono ad assorbirlo.

L'utilizzo del software Hydrus-1D, attraverso il metodo dell'inversione, ha consentito di fornire una buona caratterizzazione dei suoli analizzati. Il modello ha rappresentato correttamente la dinamica dell'acqua nel breve periodo 23 marzo – 21 aprile e dei soluti durante le prove di lisciviazione. Grazie al programma di modellazione è stato possibile eseguire le inversioni sia nella parte idraulica che nel trasporto di soluti. Per quanto riguarda lo studio idraulico, si può notare una sostanziale differenza tra i suoli nudi e quelli con *cover crops*, con valori di potenziale di saturazione e conducibilità idrica mediamente più alti nei primi. Tale dati non sembrano evidenziare la creazione di vie preferenziale.

Riguardo il movimento di soluti (in questo caso il bromo) sono stati esaminati i valori della dispersività longitudinale (D_z) (cm) e del coefficiente di ripartizione (K_d). D_z è risultata più alta nello strato superficiale in presenza di *cover crops* rispetto ai suoli nudi; invece nello strato medio e profondo l'andamento è risultato essere opposto. Questo andamento potrebbe evidenziare la presenza di possibili flussi preferenziali localizzati solo nello strato superficiale in corrispondenza dell'apparato radicale a fittone del rafano, mentre già dai 30 cm questo fenomeno sembra risultare assente. In futuro ulteriori studi cercheranno di approfondire le dinamiche che vengono a crearsi con l'uso del tracciante al bromo in presenza di specie vegetali in rigoglio vegetativo.

Per un futuro, nuovi stimoli potrebbero arrivare dalla simulazione del comportamento di un soluto come il bromuro nella soluzione circolante, così da avere delle previsioni sul movimento dei nitrati in un suolo con falda ipodermica e poterne approfondire le dinamiche per ottemperare alle vigenti normative.

5. BIBLIOGRAFIA

Arrivo A., Uricchio V.F., Borri D., Un sistema di supporto alla decisione per la tutela da inquinamento delle falde idriche. p. 1-18

Böhlke JK., 2002, Groundwater recharge and agricultural contamination. *Hydrogeology Journal*, p.1-27

Brakke M. P., Coulter J. A., Fernholz C. M., Gunsolus J. L., Huerd S. C., Lamb J. A., Moncada K. M., Sheaffer M. C., Stordahl J. B., Wiersma J. J., Wyse D. L., 1991, Risk Management Guide for Organic Producers. Arlene West Communications, p. 51-152

Campagnolo F., 2014, Idrogeologia della pianura veneta. Gestione integrata delle risorse idriche sotterranee e ricarica artificiale delle falde, p. 1-31

Constantin J., Mary B., Laurent F., Aubrion G., Fontaine A., Kerveillant P., Beudoin N., 2010, Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, p. 2-12

Dono G., Marongiu S., Severini S., Sistu G., Strazzeria E., 2008, Studio sulla Gestione sostenibile delle Risorse idriche: analisi dei modelli di consumo per usi irrigui e civili. ENEA Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente p.25-256

Ecosearch, Manuale lisimetri- lisimetri a suzione, p. 1-7

Filipović V., Coquet Y., Pot V., Houot S., Benoit P., 2015, Modeling water and isoproturon dynamics in a heterogeneous soil profile under different urban waste compost applications. *Geoderma*, p. 1-12

Gabriel J.L., Quemada M., 2011, Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system: Yield, N uptake and fertiliser fate. *European Journal of Agronomy*, p. 2-12

Gruver J., Weil R. R., White C., Lawley Y., 2016, Radishes – A New Cover Crop for Organic Farming Systems. *Organic Agriculture*, p. 1-14

ISPRA, ARPA, APPA, 2017, Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici, Sistema Nazionale per la protezione dell'Ambiente, p. 1-7, 74-82

Jirka nek I., Van Genuchten M. Th., Using the HYDRUS-1D and HYDRUS-2D Codes for Estimating Unsaturated Soil Hydraulic and Solute Transport Parameters. U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside CA, p. 1-16

K. J. S. Kung, 1989, Influence of Plant Uptake on the Performance of Bromide Tracer, Soil Science Society of America Journal, p. 1

Kristensen H.L., Thorup-Kristensen K., 2004, Root Growth and Nitrate Uptake of Three Different Catch Crops in Deep Soil Layers. Soil Sci. Soc, p. 529-537

Martello M., Dal Ferro N. , Bortolini L., Morari F., 2015 Effect of Incident Rainfall Redistribution by Maize Canopy on Soil Moisture at the Crop Row Scale. Water, p. 1-18

Peña-Barragán J.M., Ngugi M.K., Plant R.E., Six J., 2010, Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. Remote Sensing of Environment, p. 1-16

Piccoli I., Schjonning P., Lamandé M., Furlan L., Morari F., 2017, Challenges of conservation agriculture practices on silty soil. Effects on soil pore and gas transport characteristics in North-eastern Italy. Soil and Tillage Research, p. 172, 12-21

Pittelkow C. M., Liang X., Linnquist B. A., Van Groenigen K. J., Lee J., Lundy M. E., Van Kessel C., 2015, Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. Nature, 517(7534), p. 365-368

Plant guide, 2012, Oilseed radish – *Raphanus sativus* L., p. 1-5

Poepflau C., Don A., 2015, Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment, p. 1-9

Pulina G., Francesconi A.H.D., Mele M., Ronchi B., Stefanon B., Sturaro E., Trevisi E., 2011, Sfamare un mondo di nove miliardi di persone: le sfide per una zootecnia sostenibile. Italian Journal of Agronomy, p. 1-6

Ranjeet KJ., Bhabagrahi S., Rabindra K.P, 2017, Modeling the water and nitrogen transports in a soil–paddy–atmosphere system using HYDRUS-1D and lysimeter experiment. The International Society of Paddy and Water Environment Engineering and Springer Japan, p. 1-16

Ritter W.F., Scarborough R.W., Chirnside A.E.M., 1998, Winter cover crops as a best management practice for reducing nitrogen leaching. Journal of Contaminant Hydrology, p. 1-15

Roncolato F, Nuovo approccio alla gestione strumentale della fertirrigazione in ortofloricoltura, 2011, Università degli Studi di Padova – Scuola di Dottorato di ricerca in Scienze delle produzioni Vegetali, p.32-40

Rossi P., Scuola Agraria del parco di Monza: appunti di agronomia, p. 1-21

Scheda tecnica n. 1- cover crops,2014, Life Help - Soil, p.1

Scheda tecnica pH & Ion – Meter GLP 22, CRISON, Spagna 2010, p.1-2

Schipanski M.E., Barbercheck M., Douglas M.R., Finney D.M., Haider K., Kaye J.P., Kemanian A.R., Mortensen D.A., Ryan M.R., Tooker J., White C., 2014, A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. Agricultural Systems, p. 1-11

Schlegel P., Huwe B., Teixeira W.G., 2004, Modelling species and spacing effects on root zone water dynamics using Hydrus-2D in an Amazonian agroforestry system. Agroforestry Systems, p. 1-13

Šimůnek J., Van Genuchten M. Th., Šejna M., 2009, Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. Vadose Zone Journal, p.1-14

Snapp S.S., Swinton S.M., Labarta R., Mutch D., Black J.R., Leep R., Nyiraneza J., O’Neil K., 2005, Evaluating Cover Crops for Benefits, Costs and Performance within Cropping System Niches. American Society of Agronomy, p. 1-11

Thorup-Kristensen K., 2001, Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured?. Kluwer Academic Publishers., p. 1-11

Thorup-Kristensen K., Magid J., Jensen L.S., 2003, Catch Crops and Green Manures as Biological Tools in Nitrogen Management in Temperate Zones. *Advances in Agronomy*, p.1-76

Valdes-Abellan J., Jiménez-Martínez J., Candela L., 2014, Dispersivity Determination Through a Modeling Approach From a Tracer Test Based on Total Br Concentration in Soil Samples. *Soil Science*, p.1-6

Van Genuchten M. Th., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America*, Volume 8, p. 1-8

Verzeaux J., Alahmad A., Habbib H., Nivelles E., Roger D., Lacoux J., Decocq G., Hirel B., Catterou M., Spicher F., Dubois F., Duclercq J., Tetu T., 2016, Cover crops prevent the deleterious effect of nitrogen fertilisation on bacterial diversity by maintaining the carbon content of ploughed soil. *Geoderma*, p. 1-9

Wang J., Huang Y., Long H., Hou S., Xing A., Sun Z., 2017, Simulations of water movement and solute transport through different soil texture configurations under negative-pressure irrigation. *Wiley*, p. 1-14

Wyland L. J., Jackson L.E., Chaney W.E., Klonsky K., Koike S.T., Kimple B., 1996, Winter cover crops in a vegetable cropping system: Impacts on nitrate leaching, soil water, crop yield, pests and management costs. *Agriculture Ecosystems & Environment*, p.1-17

Wyland L.J., Jackson L.E., Chaney W.E., Klonsky K., Koike S.T., 1996, Winter cover crops in a vegetable cropping system: Impacts on nitrate leaching, soil water, crop yield, pests and management costs, *Agriculture Ecosystems & Environment*, p.1-17

Zangheri P., 2000, L'acqua sotterranea: una risorsa nascosta. Pozzi, acquiferi e falde nella provincia di Venezia. *Centro Internazionale Civiltà dell'Acqua*, p. 9-37

SITOGRAFIA

<http://www.ilnuovoagricoltore.it/cover-crops-tillage-radish-il-rafano-americano-che-lavora-il-terreno-al-posto-dellaratro/>

<http://www.worldometers.info/it/>

http://www.difesambiente.it/geosfera/ciclo_dell_acqua.html

<http://www.gmrstrumenti.com/lisimetri-a-suzione.html>

<http://www.ortosemplice.it/piante-aromatiche/rafano/>

http://www.arpa.veneto.it/temiambientali/acqua/acqueinterne/acquesotteranee/approfondimenti/idrogeologia-della-pianura_padana/

<http://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:77159305-1>

6. RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato reso possibile grazie alla disponibilità di Università degli Studi di Padova nell'accettare questa prova sperimentale. Desidero inoltre ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato nella realizzazione della tesi, in particolare il professor Francesco Morari e il correlatore Carlo Camarotto. Ringrazio inoltre la mia famiglia per il supporto in questi miei anni di studio.